

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**  
*Кафедра общей физики*

**Ю.А. Захаров, Р.М. Еремина, А.И. Скворцов, И.В. Яцык,  
Д.С. Блохин, К.С. Усачев**

**ОСНОВНИА МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ  
ТЕОРИИ  
ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА**

**Методические указания по выполнению  
лабораторных работ  
общего физического практикума  
по молекулярной физике и термодинамике**

**Казань – 2014**

УДК 530.10  
ББК 22.36  
Э 41

*Принято на заседании кафедры общей физики  
Протокол № 7 от 24 февраля 2014 года*

**Рецензент:**

доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры промышленной электроники КГЭУ В.А. Уланов

**Захаров Ю.А., Еремина Р.М., Скворцов А.И., Яцык И.В.,  
Блохин Д.С., Усачев К.С.**

**ОСНОВНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ.**

**ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА / сост. Ю.А. Захаров, Р.М. Ерёмина,  
А.И. Скворцов и др.-Казань: Казан. ун-т, 2014.-53с.**

Методическое пособие «Основния молекулярно-кинетической теории. Законы идеального газа» предназначены для студентов естественно - научных специальностей университетов. Приводятся описания лабораторных работ физического практикума общего курса физики, раздел «Молекулярная физика и термодинамика», по теме «Основания молекулярно-кинетической теории. Законы идеального газа». В каждой работе даны подробные описания установок, ход выполнения работ и список вопросов для самостоятельной подготовки.

© Захаров Ю.А. и др, 2014

© Казанский университет, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

211. ИССЛЕДОВАНИЕ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ.....	4
212. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛЕКУЛ ГАЗА .....	12
2131. ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЁМА ГАЗА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ (ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА) .....	16
2132. ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА ОТ ОБЪЕМА ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ (ЗАКОН БОЙЛЯ-МАРИОТТА) .....	19
2133. ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ (ЗАКОН ШАРЛЯ) .....	22
214. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ $C_p/C_v$ РАЗНЫХ ГАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИБОРА ПО ИЗУЧЕНИЮ УПРУГОГО РЕЗОНАНСА ГАЗОВ ..	26
215. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА И ИЗОХОРИЧЕСКОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА .....	29
216. СКОРОСТЬ ЗВУКА В ГАЗАХ.....	34
217. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ДЖОУЛЯ-ТОМСОНА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ.	39
218. ВОДОСТРУЙНЫЙ ВАКУУМНЫЙ НАСОС	44
Контрольные вопросы и дополнительные задания.....	51

## 211. ИССЛЕДОВАНИЕ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ

---

### *Введение*

Английский ученый Броун (Brawn) обнаружил, что мельчайшие частички цветочной пыльцы, взвешенные в воде, находятся в состоянии непрерывного движения, не подчиняющегося на первый взгляд каким-либо закономерностям.

Эйнштейном и Смолуховским была выдвинута гипотеза, что движение броуновских частиц удовлетворяет уравнению

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -b \frac{dr}{dt} + F, \quad (1)$$

где  $m$  и  $r$  масса и радиус-вектор броуновской частицы, первое слагаемое в правой части представляет собой силу вязкого трения, действующую на частицу, а второе – случайную по величине и направлению силу давления со стороны прилежащих частей жидкости. При этом считалось, что частица находится все время на одной глубине, так что сила тяжести и сила Архимеда уравновешивают друг друга.

Решая это уравнение можно показать, что среднее значение квадрата перемещения  $\langle \Delta r^2 \rangle$  шарообразной броуновской частицы прямо пропорционально времени  $\Delta t$ , за которое происходит это перемещение:

$$\langle \Delta r^2 \rangle = \frac{3kT}{\pi \eta a} \Delta t. \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $\eta$  – вязкость жидкости,  $a$  – радиус частицы.

Соотношение (2) можно проверить экспериментально. Флуктуации давления на границе броуновской частицы легко объяснить с точки зрения молекулярно-кинетических представлений. Таким образом, справедливость уравнения (2) является косвенным свидетельством молекулярной структуры вещества.

---

### *Цель работы*

Исследование броуновского движения. Экспериментальное подтверждение решения уравнения Эйнштейна–Смолуховского.

---

### *Решаемые задачи*

- ✓ Освоение техники наблюдения броуновского движения;
- ✓ Наблюдение броуновского движения;
- ✓ Знакомство с решением уравнения Эйнштейна–Смолуховского;

- ✓ Экспериментальная проверка решения уравнения Эйнштейна–Смолуховского.

---

### *Техника безопасности*

- ✓ Внимание в работе используется стекло.
- ✓ Будьте предельно аккуратны при работе с предметным и покровным стеклами;
- ✓ Не прикасаться к оптической части микроскопа;

---

### *Экспериментальная установка*

#### Приборы и принадлежности

- ✓ Оптический микроскоп
- ✓ Портативная видеокамера
- ✓ ТВ-тюнер
- ✓ Компьютер
- ✓ Исследуемая жидкость

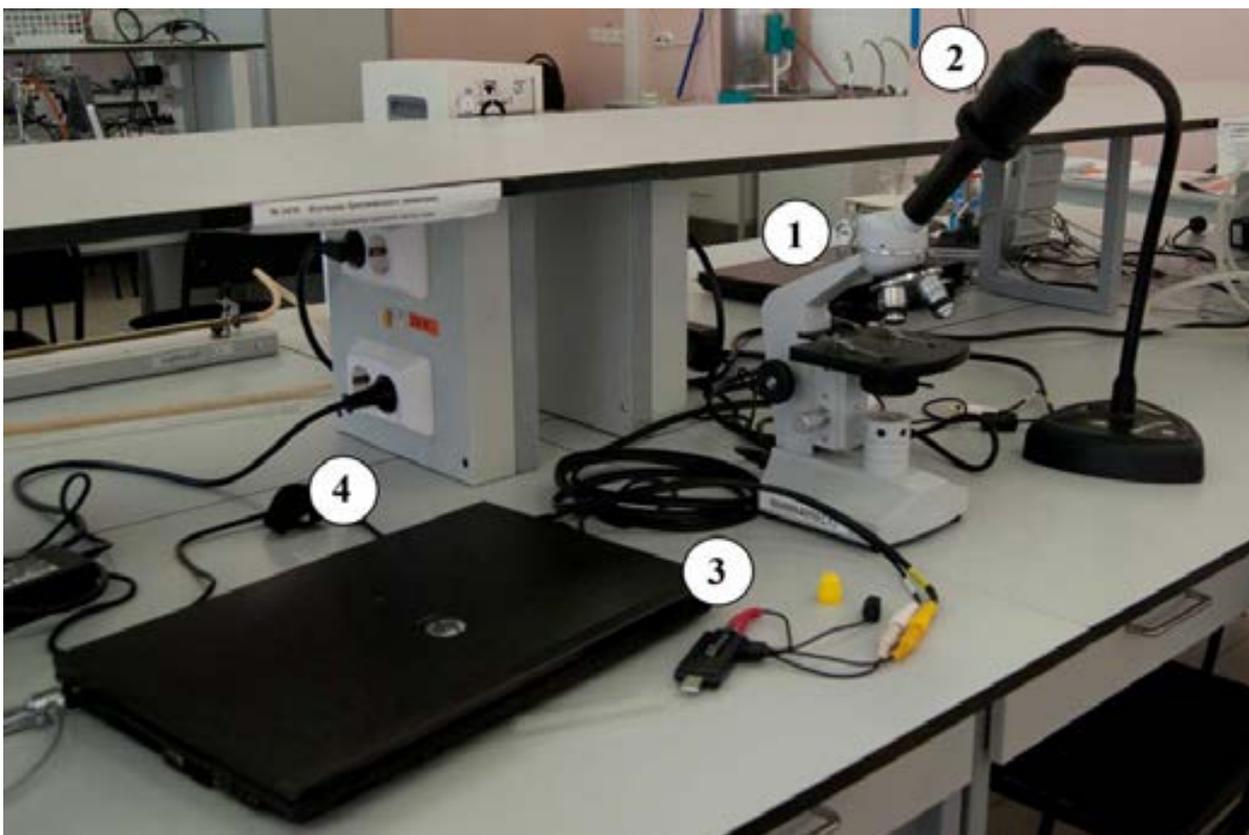


Рис. 1 Общий вид установки для наблюдения броуновского движения. (1) оптический микроскоп, (2) видеокамера, (3) ТВ-тюнер, (4) ноутбук

Увеличение всей системы определяется совокупным увеличением объектива и окуляра микроскопа, а также видеокамерой и размером экрана монитора. Оно зависит от

настройки системы и может достигать нескольких тысяч крат. Конкретное значение увеличения указано на установке. ТВ-тюнер подключается через порт USB 2.0 к компьютеру и позволяет записать изображения с камеры в цифровом виде.

В качестве исследуемой жидкости используется сильно разбавленное водой свежее молоко. Этот раствор должен быть практически прозрачным с очень слабой замутненностью. Броуновскими частицами в этом случае являются микроскопические капельки жира. Молоко должно быть не прокисшим. При скисании молока в растворе кроме капелек жира начинают двигаться бактерии, имеющие собственные механизмы перемещения, что мешает проведению эксперимента.

---

### ***Порядок выполнения работы***

#### **Подготовка установки к работе**

1. Очистить предметное стекло микроскопа. Для этого протереть кусочком салфетки его поверхность с обеих сторон в промежутке между двумя приклеенными покровными стеклами, либо в имеющемся углублении. Приготовить покровное стекло и также очистить его.
2. Пипеткой нанести каплю раствора молока на предметное стекло в середину промежутка между приклеенными стеклами (или в углубление). Диаметр капли должен составлять примерно 7 - 8 мм, не более (см. рис. 2). Сразу аккуратно накрыть промежуток покровным стеклом. Если стекло не коснулось капли, то слегка придавить его сверху (например, сухой спичкой) до касания. При этом стараться не испачкать верхнюю поверхность покровного стекла. Капля должна одновременно касаться поверхностей предметного и покровного стекол (см. рис. 3).



Рис 2. Предметное стекло с раствором молока

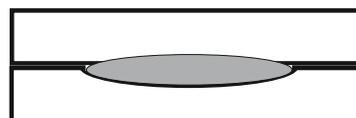


Рис. 3. Сверху покровное стекло, снизу предметное стекло, раствор должен касаться обоих стекол.

3. Отодвинуть предметный столик от объектива микроскопа, вращая соответствующую ручку на корпусе микроскопа (см. рис. 4, стрелка указывает на ручку).
4. Осторожно поместить образец на предметный столик.
5. Включить электропитание осветителя микроскопа, видеокамеры и компьютера.
6. Открыть диафрагму осветителя. Ручку регулировки яркости осветителя поставить в среднее положение.

7. Двигая стекла с образцом, добиться попадания в просвечивающий пучок микроскопа.
8. Вплотную придвинуть образец к объективу, избегая соприкосновения объектива с покровным стеклом. Для этого наблюдать за промежутком между ними сбоку.  
**ВНИМАНИЕ** возможно продавливание покровного стекла окуляром микроскопа.
9. Плавно отодвигая предметный столик от объектива, получить резкое изображение крупных капелек жира. Они имеют сферическую форму с резкими очертаниями. Первоначально капельки располагаются во всей толще раствора, но постепенно всплывают к покровному стеклу и, оказавшись там, могут перемещаться только в горизонтальной плоскости. Необходимо настроиться на самый верхний слой частиц! Если на экране находится более 10-и частиц, то раствор молока оказался слишком концентрированным. Его необходимо разбавить и сменить образец в микроскопе.
10. Отрегулировать яркость и контрастность изображения с помощью ручек регулировки яркости и диафрагмы осветителя микроскопа. Яркость просвечивающего пучка должна быть по возможности минимальной, иначе раствор нагреется и быстро высохнет.
11. Прикрепить камеру к окуляру микроскопа.
12. Создать папку с именем группы в следующем каталоге **D:\студент\**
13. Запустить программу AVerTV6 (находиться на рабочем столе).
14. Добиться четкого изображения броуновских частиц при помощи объектива камеры.

Если все частицы на экране упорядоченно перемещаются, подождать около 1 минуты до исчезновения этого течения.

### **Проведение измерений**



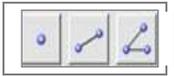
Рис. 4. Оптический микроскоп, вертикальной стрелкой указана ручка для перемещения предметного столика, горизонтальная стрелка указывает на регулятор яркости осветителя

1. Снять видео в программе AVerTV6 (кнопка «запись»).  
Время записи 50 сек.
2. Перенести из папки D:\студент\ видео в с созданную Вами папку
3. Закрыть программу AVerTV6.
4. Запустить программу VirtualDub (находится на рабочем столе)
5. Открыть ранее сохраненный видео файл в VirtualDub (Файл → открыть видео файл...)
6. Выбрать на экране активно перемещающуюся броуновскую частицу с диаметром  $D$  около 2-3 мм и

вывести ее изображение в центр экрана перемещением предметного столика. Определить как можно точнее ее реальный радиус  $a$  с учетом увеличения  $\Omega$  оптической системы:  $a=D/2\Omega$ . Увеличение оптической системы указано на микроскопе. Определить также минимальный размер более крупной частицы, броуновское движение которой становится незаметным.

- Преобразовать видео файлы в серию фотографий. Для этого в меню **Файл** выбрать команду **Экспорт**, а затем — команду **Сохранить серию картинок**. В окне **Фильтр вывода картинок: формат имени файла** для серий картинок, которые соответствуют различным частицам, поставьте различные префиксы, например латинские  $a$ ,  $b$  и  $c$ . В окне **Каталог для хранения картинок**: выбрать **D:\студент\группа\**. Установить флажок в **Выходной формат**: на Windows BMP. Нажать **ОК**. Закрыть приложение VirtualDub. Файл → Экспорт → сохранить серию картинок
- Установить величину временного интервала между кадрами. Выставьте частоту кадров. Частота кадров равная 0,16 соответствует временному интервалу между кадрами 5с.
- Повторить действия пунктов 6-8 еще для других двух частиц.
- По окончании измерений отключить электропитание установки. Вынуть и протереть предметное и покровное стекла и положить их в футляры.

### Обработка результатов эксперимента.

- Измерение изменения положения броуновской частицы с течением времени производится с помощью приложения «Измеритель» версия 1.0 ЗАО «ИС». Для загрузки серии файлов с фотографиями необходимо выполнить команду **Загрузить серию...** в меню **Файл**. Далее в окне **Открыть...** выделить файлы соответствующие одной из частиц и нажать на кнопку **Открыть**. На экране появится изображение кадра под номером ноль. С помощью мыши и кнопок двойных стрелок в нижней части окна или стрелок перемещения на клавиатуре можно переходить от одного кадра к другому.
- Нажатие «стрелкой» (кнопка ) на первую из кнопок ) позволяет создавать объекты «точка» в поле изображения. При переходе к следующему кадру, созданные объекты сохраняются. Зафиксируйте положение выбранной частицы в каждом кадре объектом «точка» начиная с кадра под номером 1.
- Далее, необходимо для полученной совокупности положений частицы выявить наличие или отсутствие постоянной действующей силы и выбрать систему отсчета. Если траектория частицы вытянута вдоль некоторой прямой, то такое поведение

могло быть обусловлено действием постоянной силы. Эта сила, например, может быть вызвана небольшим наклоном предметного столика. Направим вдоль этой прямой ось  $Y$  декартовой системы координат. В уравнении Эйнштейна-Смолуховского постоянная сила не учитывается, поэтому измерять перемещения можно только вдоль оси  $X$  перпендикулярной  $Y$ .

4. Если траектория частицы не имеет ярко выраженного направления оси системы координат можно ориентировать произвольно и определять перемещения вдоль любой из этих осей. Для создания система координат на рабочее поле нажимаем на кнопку



, затем щелкаем левой кнопкой мыши на рабочем поле. Появляется декартова система координат и мерный отрезок. При нажатой кнопке  перемещаем и ориентируем необходимым образом систему координат. 100 мкм соответствует 72 мм на экране. Поэтому, для задания масштаба, при нажатой кнопке , удлиняем мерный отрезок до 72 мм. Далее фиксируем длину мерного отрезка 0.1 мм в окнах «Мерный отрезок». При нажатии кнопки «Показать таблицу» выводится окно с таблицей на передний план. Далее выбираем вкладку «Точки». Таблица содержит координаты каждой точки.

5. Для отчета необходимо сохранить изображение на экране. Для этого воспользуйтесь командой **Экспорт изображения** в меню **Файл**. С помощью команды **Содержимое экрана** с отрезками на фотографии можно сохранить на жестком диске в виде графического файла, а таблицу экспортировать в Excel. Обе операции можно выполнить с помощью вкладки **Файл – Экспорт изображения** и **Экспорт таблиц** в Excel.

6. Далее необходимо измерить изменение координаты  $X$  за время

$$\begin{aligned} \Delta t = 5\text{с} \quad \Delta x(\Delta t) &= x_{n+1} - x_n, \\ 2\Delta t = 10\text{с} \quad \Delta x(2\Delta t) &= x_{n+2} - x_n, \\ 3\Delta t = 15\text{с} \quad \Delta x(3\Delta t) &= x_{n+3} - x_n, \end{aligned}$$

где  $x_i$  координата частицы,  $x_n$  одна из этих координат, выбранная произвольно.

7. Вычислить среднеквадратичные значения проекций перемещений частицы на ось  $X$  для трех промежутков времени по формулам:

$$\langle \Delta x^2(\Delta t) \rangle = \frac{\sum_{n=1}^m (x_{n+1} - x_n)^2}{m},$$

$$\langle \Delta x^2(2\Delta t) \rangle = \frac{\sum_{n=1}^m (x_{n+2} - x_n)^2}{m},$$

$$\langle \Delta x^2(3\Delta t) \rangle = \frac{\sum_{n=1}^m (x_{n+3} - x_n)^2}{m}.$$

где  $m$  – число перемещений.

8. Построить график зависимости среднеквадратичного перемещения частицы от времени  $\Delta x^2(t)$ . Экспериментальным доказательством справедливости закона Эйнштейна-Смолуховского является линейность графиков.

---

*Контрольные вопросы и дополнительные задания*

1. Как оценить размер молекул?
2. Сколько молекул воды вытесняются наблюдаемой броуновской частицей?
3. Почему увеличение размера броуновских частиц приводит к замедлению их движения?
4. Как влияет изменение температуры на броуновское движение?
5. Понятие флуктуации. Флуктуации плотности и температуры.
6. Предположим, что броуновская частица является шаром радиуса 100 мкм. На половину поверхности частицы действует давление  $p_1$ , а на другую половину  $p_2$ . Какова должна быть разница  $p_1 - p_2$ , чтобы за одну секунду частица сдвинулась на расстояние, равное ее радиусу? Вязким трением пренебечь. Оценить во сколько раз должна отличаться концентрация молекул для обеспечения такой разницы давлений?
7. Решение уравнения Эйнштейна–Смолуховского.

## 212. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛЕКУЛ ГАЗА

### *Введение*

С точки зрения молекулярно-кинетической теории газ представляет собой совокупность отдельных микрочастиц (молекул, атомов, ионов). Для простоты можно считать их абсолютно твердыми шариками. Наблюдение броуновского движения частиц позволяет предположить, что молекулы находятся в непрерывном движении. Большая сжимаемость газов говорит о том, что молекулы газа находятся на большом расстоянии друг от друга. К кинематическим параметрам газа относятся: средняя длина свободного пробега молекул  $\langle \lambda \rangle$  (расстояние, которое пролетает молекула между двумя столкновениями), среднее эффективное сечение столкновения  $\langle \sigma \rangle = 0.25\pi \langle D \rangle^2$ , где  $D$  – максимальное расстояние между центрами сталкивающихся молекул, при котором происходит изменение их скорости: эффективный диаметр молекулы). Средняя частота столкновений будет пропорциональна сечению столкновений. Если концентрация молекул равна  $n$ , а средняя скорость теплового движения молекул  $\langle u \rangle$ , то средняя частота столкновений  $\langle z \rangle$  равна:

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \langle \sigma \rangle n \langle u \rangle.$$

В этой формуле учтено, что средняя относительная скорость движения молекул в  $\sqrt{2}$  больше средней скорости их движения  $\langle u \rangle$ .

Среднюю длину свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  можно получить, поделив средний путь, проходимый молекулой за единицу времени, на число столкновений за это же время. Так как путь, проходимый в единицу времени, численно равен скорости, то длина свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  равна:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle u \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \langle \sigma \rangle n} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi \langle D \rangle^2 n}$$

На основании представлений молекулярно-кинетической теории газов, в случае справедливости распределения Максвелла по скоростям можно найти связь между динамической вязкостью  $\eta$  и этими параметрами:  $\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle u \rangle$ , где  $\rho$  – плотность газа. В состоянии равновесия, когда справедливо распределение Максвелла по скоростям, средняя скорость равна:

$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ , где R - универсальная газовая постоянная,  $\mu$  - молярная масса газа. Таким образом, выражение для средней длины свободного пробега через макропараметры равно:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho\langle u \rangle} = \frac{3\eta\sqrt{\pi\mu}}{\rho\sqrt{8RT}}$$

Т.е., измерив температуру, коэффициент вязкости, и зная молярную массу газа, можно вычислить длину свободного пробега, и далее, по формуле оценить средне сечение столкновения, учитывая, что  $n = \frac{p}{kT}$ .

### ***Цель работы***

Определение кинематических характеристик различных газов: длины свободного пробега, эффективного сечения столкновений.

### ***Решаемые задачи***

- ✓ Определение вязкости гелия, углекислого газа и воздуха.

### ***Техника безопасности***

- ✓ Внимание: в работе используется стекло.
- ✓ Будьте предельно аккуратны при работе с газовым шприцом;

### ***Экспериментальная установка***

#### **Приборы и принадлежности**

- ✓ V-образное основание штатива, 28 см.
- ✓ Штативный стержень, 75 см
- ✓ S образный зажим
- ✓ Штангенциркуль
- ✓ Безопасная емкость для вакууммирования 50 мл
- ✓ Хомуты для резиновых трубок 12-20 мм (10 шт.)
- ✓ Каучуковая трубка 4 мм Ø
- ✓ Вакуумный шланг
- ✓ Штуцер прямой полипропиленовый РР, Ø 4÷15 мм
- ✓ Газовый шприц 100 мл, с 3-ходовым краном
- ✓ Держатель 100 мл газового шприца
- ✓ Универсальный зажим, 0-80 мм
- ✓ Капиллярная трубка Ø 0,5 мм длина 100 мм
- ✓ Цифровой секундомер

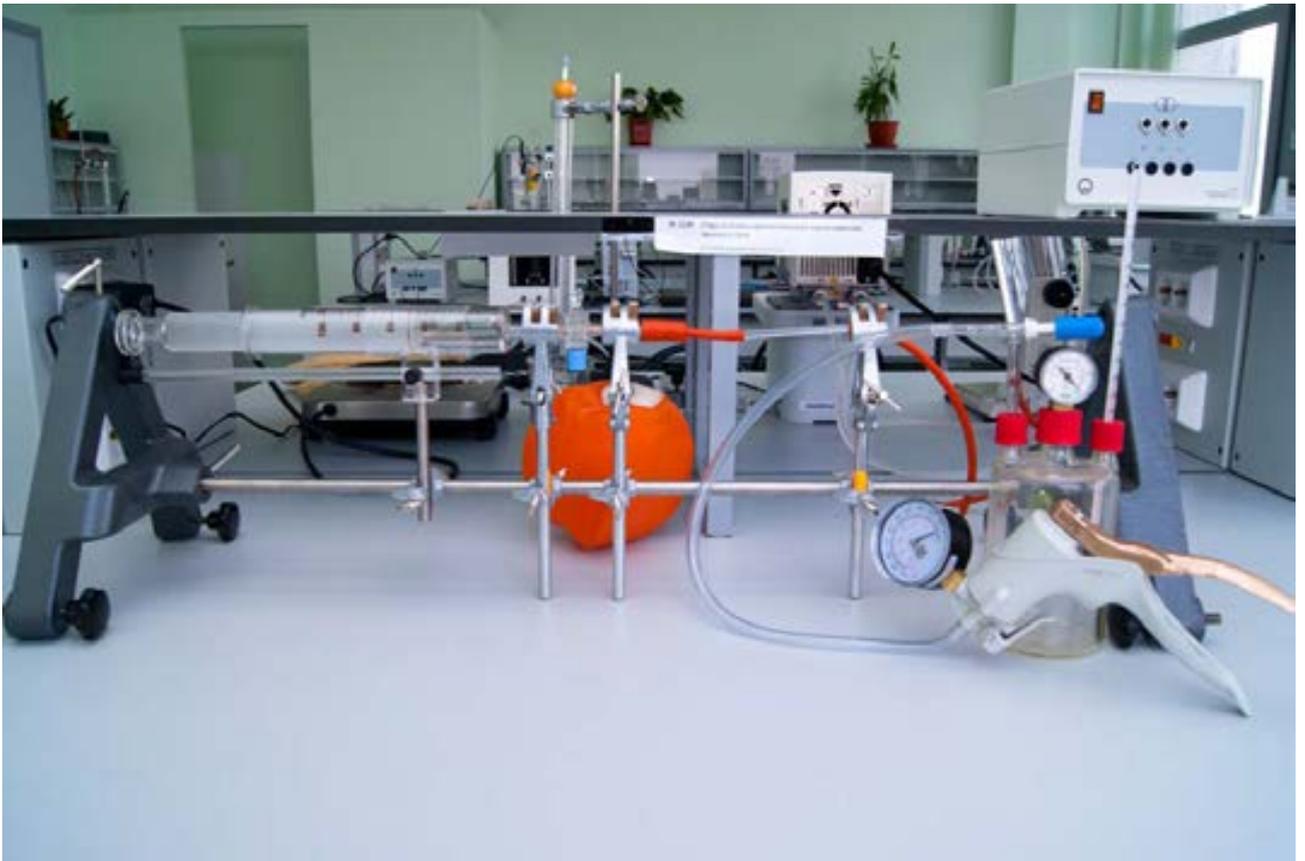


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

---

### Порядок выполнения работы

#### Упражнения №1.

1. Установите поршень на  $V=50$  ml.
2. Откачайте ручным насосом газ из ёмкости. По показаниям манометра определите изменения давления  $\Delta p$  (примерно 500 mbar; измерения проводятся по черной шкале).
3. Откройте вентиль и определите время  $t$ , за которое газ пройдет через капилляр.
4. Измерьте длину капилляра  $l$  с помощью штангенциркуля, объем внутренней полости капилляра указан на капилляре.
5. Вычислите радиус капилляра  $R$ , используя формулу объема цилиндра. Если объем внутренней полости не указан, то  $V=0.04$  мл.
6. По формуле  $\eta = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot t \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot V}$  вычислите вязкость газа.
7. Опыт повторите не менее пяти раз. Результаты занесите в таблицу.
8. Оцените относительную погрешность измерения вязкости газа.

9. Сравните полученное значение вязкости воздуха при комнатной температуре с табличным значением ( $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$  при  $18^\circ \text{C}$ )
10. Вычислите плотность воздуха по формуле  $\rho = pM/RT$ , где  $M = 0,029 \text{ кг/моль}$  – молярная масса воздуха,  $R$  - универсальная газовая постоянная, давление  $p$  и температуру  $T$  измерьте по приборам в лаборатории.
11. Вычислите среднюю арифметическую скорость  $\langle u \rangle$  молекул воздуха при данных условиях.
12. Вычислите среднюю длину свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  молекул воздуха при нормальных условиях, исходя из формулы связи ее с коэффициентом вязкости 
$$\eta = \frac{\langle \lambda \rangle \langle u \rangle \rho}{3}.$$
13. Исходя из формулы  $p = nkT$ , вычислите концентрацию  $n$  молекул воздуха в емкости для вакуумирования ( $k$  - постоянная Больцмана – равна  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ).
14. Вычислить среднее число столкновений молекул, испытываемых одной молекулой за одну секунду  $\langle z \rangle = \frac{\langle u \rangle}{\langle \lambda \rangle}.$
15. Вычислить среднее эффективное сечение столкновений, используя соотношение 
$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \langle \sigma \rangle n}.$$

### Упражнение №2.

1. Наберите газ (гелий или углекислый газ по указанию преподавателя) в камеру.
2. Поршень газового шприца установите на ноль.
3. Подсоедините камеру с газом к газовому шприцу.
4. Запустите газ в и по положению поршня определите объем газа.
5. Выполните пункты 2-7 упражнения №1.

## 2131. ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЁМА ГАЗА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ (ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА)

### Введение

Количественное исследование зависимости объема газа от температуры при неизменном давлении было произведено в 1802 г. французским физиком и химиком Жозефом Луи Гей-Люссаком (1778—1850). Опыты показали, что приращение объема газа пропорционально приращению температуры. Поэтому тепловое расширение газа можно, так же как и для других тел, охарактеризовать при помощи температурного коэффициента объемного расширения. Экспериментально установлено, что температурный коэффициент объемного расширения  $\beta$  у всех газов одинаков (точнее, почти одинаков) и равен:

$$\beta = \frac{V' - V_0}{V_0(t' - t_0)} \approx \frac{1}{273^\circ}. \quad (1)$$

Коэффициент объемного расширения измеряется в градусы Цельсия  $^\circ\text{C}^{-1}$ . За начальный объем  $V_0$  примем объем при температуре  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . В таком случае приращение температуры газа равно температуре  $t = t'$  отсчитанной по шкале Цельсия. Тогда, температурный коэффициент объемного расширения:

$$\beta = \frac{V - V_0}{V_0 t}, \text{ и } V = V_0(1 + \beta t).$$

Следует, однако, иметь в виду, что закон Гей-Люссака не оправдывается, когда газ сильно сжат или настолько охлажден, что он приближается к состоянию сжижения. Подставим значение температурного коэффициента объемного расширения  $\beta$  в формулу температурной зависимости объема газа:

$$V \approx \frac{V_0(273 + t)}{273}. \quad (2)$$

Величину  $(273 + t)$  можно рассматривать как значение температуры, отсчитанное по новой температурной шкале, единица которой такая же, как и у шкалы Цельсия, а за нуль принята точка, лежащая на  $273^\circ$  ниже точки, принятой за нуль шкалы Цельсия, т. е. точки таяния льда. Нуль этой новой шкалы называют абсолютным нулем. Эту новую шкалу называют термодинамической шкалой температур, где  $T \approx t + 273^\circ$ .

Тогда, при постоянном давлении справедлив закон Гей-Люссака:

$$V \propto T. \quad (3)$$

---

### **Цель работы**

Проверка закона Гей-Люссака

---

### **Решаемые задачи**

- ✓ Определение зависимости объема газа от температуры при постоянном давлении
  - ✓ Определение абсолютной шкалы температур путем экстраполяции в сторону низких температур
- 

### **Техника безопасности**

- ✓ Внимание: в работе используется стекло;
  - ✓ Будьте предельно аккуратны при работе с газовым термометром; стеклянным сосудом и мерным стаканом
  - ✓ Будьте предельно внимательны при работе с горячей водой.
- 

### **Экспериментальная установка**

Для проверки закон Гей-Люссака используется газовый термометр. Он состоит из стеклянного капилляра с капелькой ртути, открытого с одного конца. Термометр помещают в воду с температурой около 90 °С и эта система постепенно охлаждается. Открытый конец газового термометра находится при атмосферном давлении, и давление столба воздуха в термометре остается постоянным на протяжении всего эксперимента. Объем столба воздуха определяется по высоте столба газа под капелькой ртути и сечения капилляра по формуле:

$$V = \pi r^2 h, \quad (4),$$

где  $r$ - внутренний диаметр капилляра (1,35мм);  $h$  – высота столба газа.

### **Приборы и принадлежности**

- ✓ Газовый термометр
- ✓ Мобильный CASSY Lab
- ✓ Термопара
- ✓ Электрическая нагревательная плитка
- ✓ Стеклянный мерный стакан
- ✓ Стеклянный сосуд
- ✓ Ручной вакуумный насос

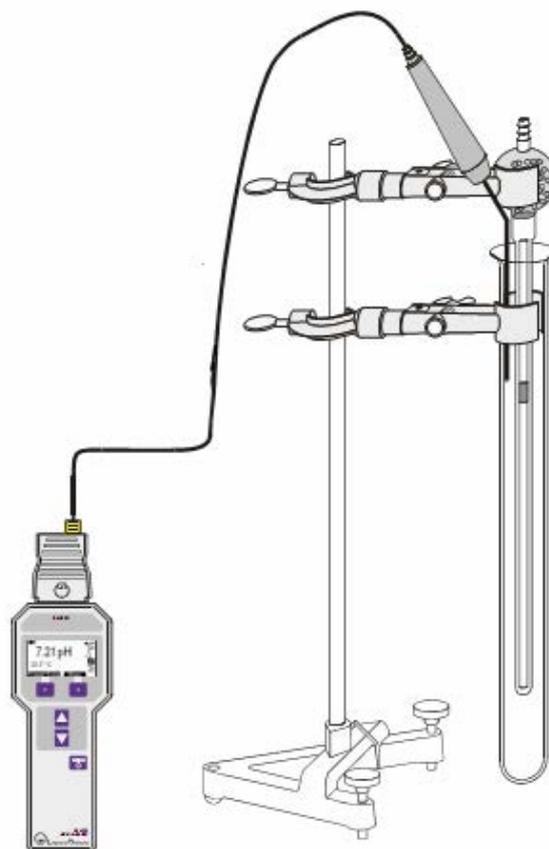


Рис.1. Схема эксперимента.

## Порядок выполнения работы

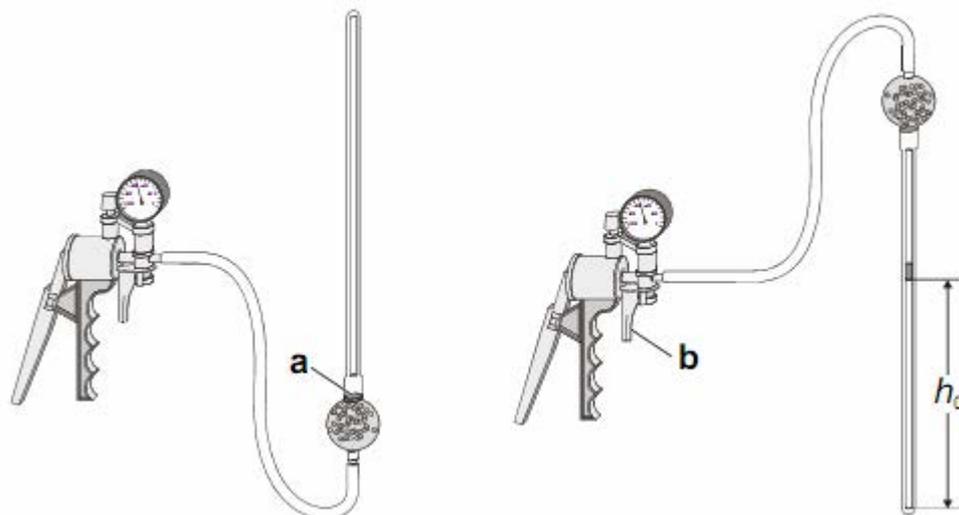


Рис.2.

1. Откройте заглушку газового термометра, подключите к термометру ручной вакуумный насос.
2. Поверните осторожно термометр как показано слева на рис. 2 и откачайте воздух из него с помощью насоса так, чтобы капелька ртути оказалась в точке а) (см. рис.2).
3. После того как капелька ртути собралась в точке а) поверните термометр отверстием наверх и спустите нагнетенный воздух ручкой b) на насосе (см. рис.2) осторожно, чтобы ртуть не разделилась на несколько капелек.
4. Отсоедините насос от термометра. Отверстие термометра должно оставаться открытым.
5. Нагрейте воду в стеклянном сосуде на плитке до  $90^{\circ}\text{C}$ .
6. Налейте горячую воду в стеклянный сосуд.
7. Поместите в сосуд газовый термометр, закрепив его на штативе.
8. Поместите термопару в воду.
9. Измерьте высоту столба воздуха под капелькой ртути при изменении температуры.
10. Постройте график измеренной зависимости объема столба воздуха от температуры, откладывая по оси абсцисс – температуру в градусах Цельсия.
11. Продолжите график до пересечения с осью абсцисс. Определите температуру пересечения, объясните полученные результаты.
12. По тангенсу угла наклона определите коэффициент объемного расширения газа.
13. Рассчитайте зависимость объема от температуры при постоянном давлении по закону Гей-Люссака и постройте график. Сравните теоретические и экспериментальные зависимости.

## 2132. ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА ОТ ОБЪЕМА ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ (ЗАКОН БОЙЛЯ-МАРИОТТА)

---

### *Введение*

Состояние идеального газа полностью описывается измеряемыми величинами: давлением, температурой, объемом. Отношение между этими тремя величинами определяется основным газовым законом:

$$pV = \nu RT, \quad (1)$$

где  $p$  – давление;  $V$  - объем;  $T$  – температура;  $\nu$  - количество идеального газа в молях;  $R$  - универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/(К·моль)).

Если одна из величин давление, объем или температура остается постоянной, то другие две величины не могут быть изменены независимо друг от друга. Например, при постоянной температуре выполняется закон Бойля-Мариотта в виде:

$$pV = const \quad (2)$$

---

### *Цель работы*

Проверка закона Бойля-Мариотта.

---

### *Решаемые задачи*

- ✓ Измерение давления воздуха в шприце при изменении объема учитывая, что температура газа постоянна.

---

### *Экспериментальная установка*

#### *Приборы и принадлежности*

- ✓ Шприц
- ✓ Манометр
- ✓ Ручной вакуумный насос

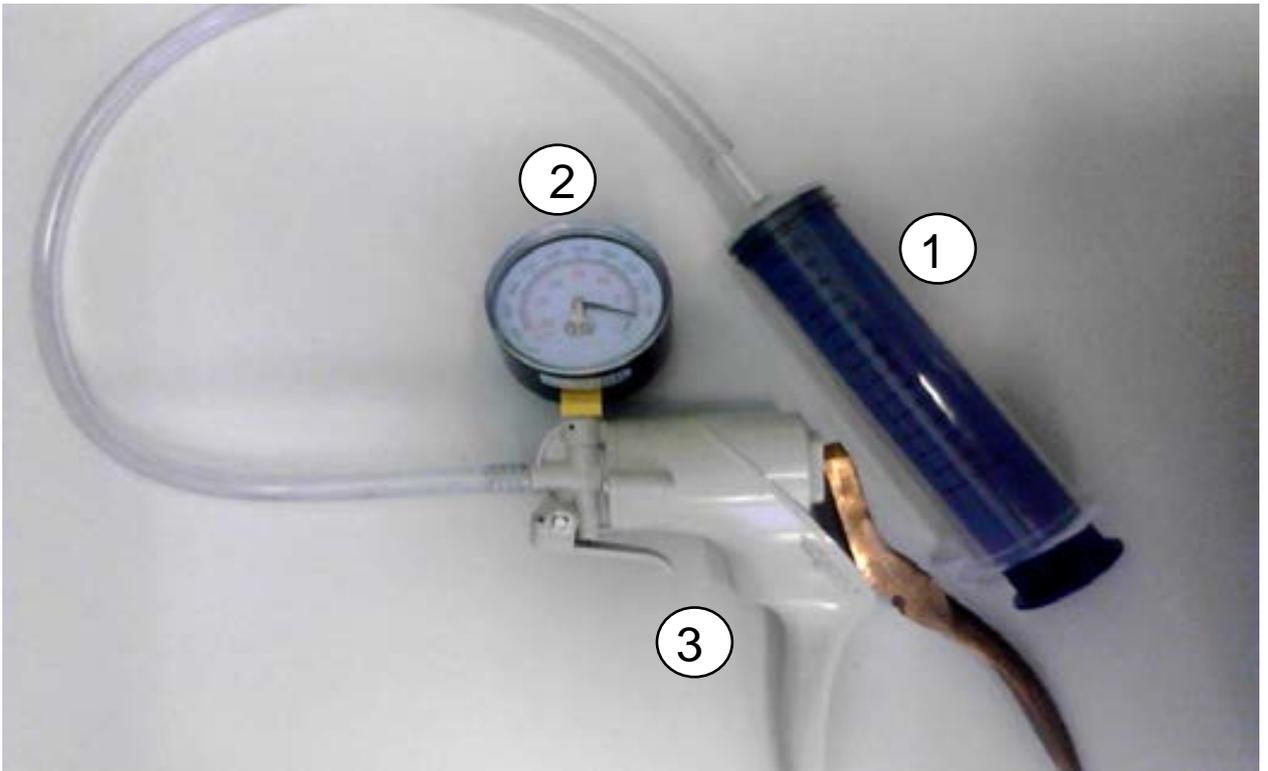


Рис 1. Общий вид установки по изучению закона Бойля – Мариотта. (1) шприц, (2) манометр (отсчет производить по черной шкале), (3) ручной вакуумный насос

В данном эксперименте закон Бойля – Мариотта подтверждается с помощью установки показанной на рисунке 1. Объем воздуха в шприце определяется следующим образом:

$$V = \pi r^2 h \quad (3),$$

где  $r$  радиус шприца, а  $h$  – расстояние от носика до поршня шприца.

Давление в системе нужно находить как:

$$p = p_0 + \Delta p \quad (4),$$

где  $p_0$  атмосферное давление, а  $\Delta p$  – давление, измеренное при помощи манометра.

#### *Примечания*

– Манометр на насосе регистрирует разрежение ( но не давление) газа в шприце. Отсчеты снимать по черной шкале, оцифрованной в миллибарах. Чтобы определить давление под поршнем, надо из атмосферного давления вычесть показания манометра, выраженное в паскалях. Атмосферное давление равно приблизительно 1 бар, что соответствует 100000 Па.

---

#### **Порядок выполнения работы**

1. Установите поршень шприца на отметке 50 мл.

2. Плотно надеть свободный конец соединительного шланга ручного вакуумного насоса на выходной патрубок шприца.
3. Выдвигая поршень, увеличивайте объем с шагом 5 мл, фиксируйте показания манометра по черной шкале.
4. Чтобы определить давление под поршнем, надо из атмосферного давления вычесть показания манометра, выраженного в паскалях. Атмосферное давление равно приблизительно 1 бар, что соответствует 100 000 Па.
5. Для обработки результатов измерений следует учитывать наличие воздуха в соединительном шланге. Для этого к объему полости шприца необходимо прибавить объем полости соединительного шланга. Измерьте объем соединительного шланга, измерив длину шланга рулеткой, а диаметр шланга штангенциркулем, учитывая, что толщина стенок составляет 1,5 мм.
6. Результаты измерений представить в виде таблицы:

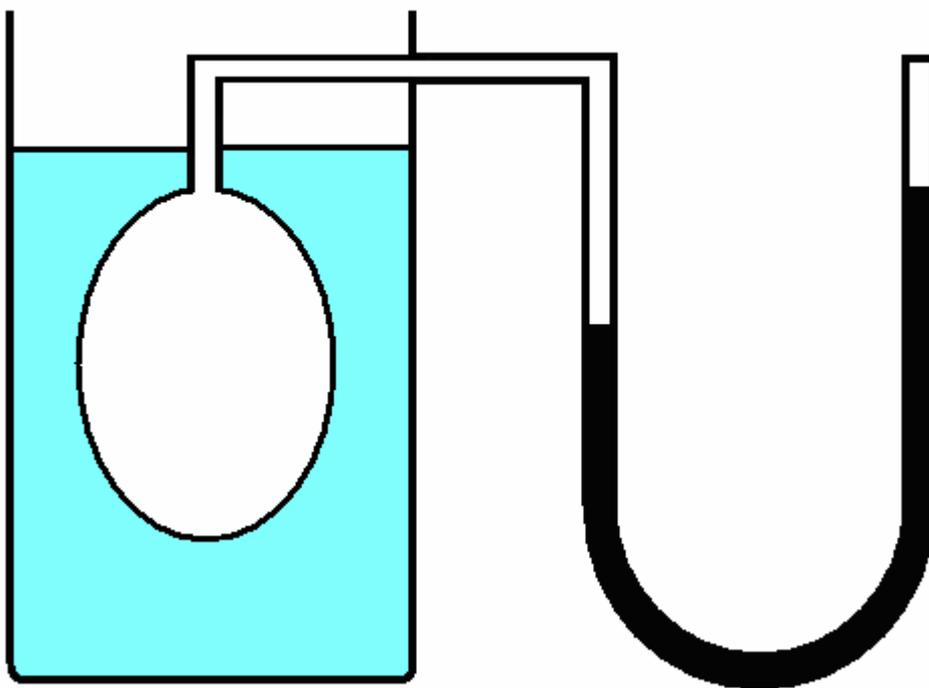
№	Объем шприца, мл	Показания манометра, мбар	V (объем шприца и шланга), $10^{-4} \text{ м}^3$	P (давление в шприце), $\cdot 10^4 \cdot \text{Па}$	pV, Па·м <sup>3</sup>

7. Постройте график измеренной зависимости объема воздуха от давления.
8. Рассчитайте зависимость объема от давления при постоянной температуре по закону Бойля-Мариотта и постройте график.
9. Сравните теоретические и экспериментальные зависимости.

## 2133. ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ (ЗАКОН ШАРЛЯ)

### *Введение*

Рассмотрим зависимость давления газа от температуры при условии неизменного объема определенной массы газа. Эти исследования были впервые произведены в 1787 г. Жаком Александром Сезаром Шарлем (1746—1823). Газ нагревался в большой колбе, соединенной с ртутным манометром в виде узкой изогнутой трубки. Пренебрегая ничтожным увеличением объема колбы при нагревании и незначительным изменением объема при смещении ртути в узкой манометрической трубке. Таким образом, можно считать объем газа неизменным. Подогревая воду в сосуде, окружающем колбу, измеряли температуру газа по термометру  $T$ , а соответствующее давление  $p$  — по манометру. Наполнив сосуд тающим льдом, определяли давление  $p_0$ , и соответствующую температуру  $T_0$ . Было установлено, что если при  $0^\circ\text{C}$  давление  $p_0$ , то при нагревании на  $1^\circ\text{C}$  приращение давления будет в  $\alpha p_0$ . Величина  $\alpha$  имеет одно и то же значение (точнее, почти одно и то же) для всех газов, а именно  $1/273^\circ\text{C}^{-1}$ . Величину  $\alpha$  называют температурным коэффициентом давления.



Закон Шарля позволяет рассчитать давление газа при любой температуре, если известно его давление при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ . Пусть давление данной массы газа при  $0^{\circ}\text{C}$  в данном объеме  $p_o$ , а давление того же газа при температуре  $t - p$ . Температура меняется на  $t$ , а давления изменяется на  $\alpha p_o t$ , тогда давление  $p$  равно:

$$p = p_o + \alpha p_o t = p_o (1 + \alpha t) \quad (1).$$

При очень низких температурах, когда газ приближается к состоянию сжижения, а также в случае сильно сжатых газов закон Шарля неприменим. Совпадение коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , входящих в закон Шарля и закон Гей-Люссака, не случайно. Так как газы подчиняются закону Бойля — Мариотта при постоянной температуре, то  $\alpha$  и  $\beta$  должны быть равны между собой.

Подставим значение температурного коэффициента давления  $\alpha$  в формулу температурной зависимости давления:

$$p \approx \frac{p_o (273 + t)}{273} \quad (2).$$

Величину  $(273+t)$  можно рассматривать как значение температуры, отсчитанное по новой температурной шкале, единица которой такая же, как и у шкалы Цельсия, а за нуль принята точка, лежащая на  $273^{\circ}$  ниже точки, принятой за нуль шкалы Цельсия, т. е. точки таяния льда. Нуль этой новой шкалы называют абсолютным нулем. Эту новую шкалу называют термодинамической шкалой температур, где  $T \approx t + 273^{\circ}$ .

Тогда, при постоянном объеме справедлив закон Шарля:

$$p \propto T \quad (3)$$

---

### *Цель работы*

Проверка закона Шарля

---

### *Решаемые задачи*

- ✓ Определение зависимости давления газа от температуры при постоянном объеме
- ✓ Определение абсолютной шкалы температур путем экстраполяции в сторону низких температур

---

### *Техника безопасности*

- ✓ Внимание: в работе используется стекло.
- ✓ Будьте предельно аккуратны при работе с газовым термометром; стеклянным сосудом и мерным стаканом.
- ✓ Будьте предельно внимательны при работе с горячей водой.

## Экспериментальная установка

### Приборы и принадлежности

- ✓ Газовый термометр
- ✓ Мобильный CASSY Lab
- ✓ Термопара
- ✓ Электрическая нагревательная плитка
- ✓ Стекломерный стакан
- ✓ Стекломерный сосуд
- ✓ Ручной вакуумный насос

При откачке воздуха при комнатной температуре с помощью ручного насоса, создается давление на столб воздуха  $p_0 + \Delta p$ , где  $p_0$  – внешнее давление. Капля ртути также оказывает давление на столб воздуха:

$$p_{Hg} = \rho_{Hg} g h_{Hg}, \quad (3),$$

где  $\rho_{Hg} = 13,6 \text{ г/см}^3$  – плотность ртути;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $h_{Hg}$  – высота капли ртути.

Общее давление на столб воздуха в газовом термометре определяется выражением:

$$p = p_0 + \Delta p + p_{Hg}. \quad (4)$$

В данном эксперименте этот закон подтверждается с помощью газового термометра. Термометр помещают в воду с температурой около  $90^\circ\text{C}$  и эта система постепенно охлаждается. Откачивая воздух из газового термометра с помощью ручного вакуумного насоса, поддерживают постоянный объем воздуха во время охлаждения.

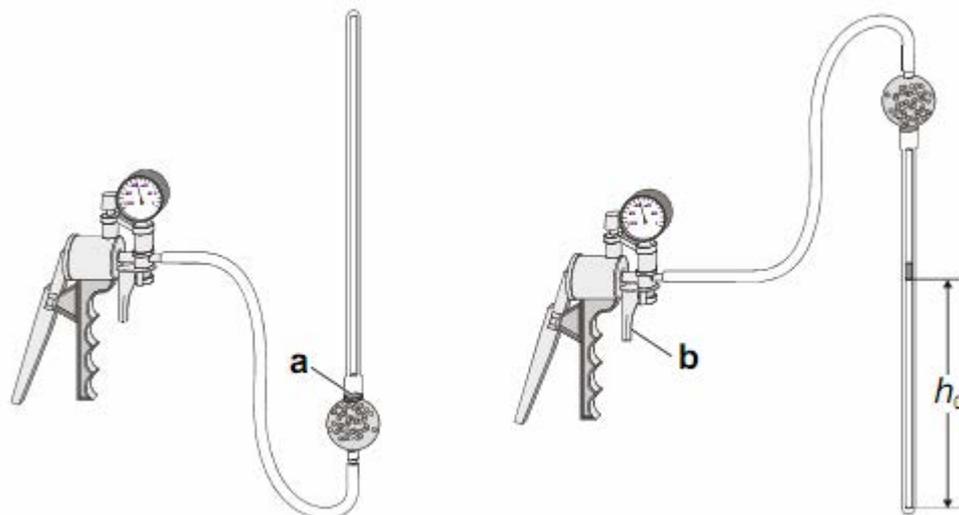


Рис.2.

---

### Порядок выполнения работы

1. Откройте заглушку газового термометра, подключите к термометру ручной вакуумный насос.
2. Поверните осторожно термометр как показано слева на рис. 2 и откачайте воздух из него с помощью насоса так, чтобы капелька ртути оказалась в точке а) (см. рис.2).
3. После того как капелька ртути собралась в точке а) поверните термометр отверстием вверх и спустите нагнетенный воздух ручкой b) на насосе (см. рис.2) осторожно, чтобы ртуть не разделилась на несколько капелек.
4. Нагреть воду в стеклянном сосуде на плитке до  $90^{\circ}\text{C}$ .
5. Налить горячую воду в стеклянный сосуд.
6. Поместить в сосуд газовый термометр, закрепив его на штативе.
7. Поместить термометр в воду, постепенно эта система охлаждается. Откачивая воздух из газового термометра с помощью ручного вакуумного насоса, поддерживаете постоянный объём столба воздуха в течении всего процесса охлаждения.
8. Фиксируйте показание манометра  $\Delta p$  и температуру  $T$ .
9. Постройте зависимость полного давления газа  $p_0 + \Delta p + p_{\text{Hg}}$  от температуры в  $^{\circ}\text{C}$ .
10. Продолжите график до пересечения с осью абсцисс. Определите температуру пересечения, объясните полученные результаты.
11. По тангенсу угла наклона определите температурный коэффициент давления.
12. Рассчитайте зависимость давления от температуры при постоянном объеме по закону Шарля и постройте график. Сравните теоретические и экспериментальные зависимости.

## 214. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ $C_p/C_v$ РАЗНЫХ ГАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИБОРА ПО ИЗУЧЕНИЮ УПРУГОГО РЕЗОНАНСА ГАЗОВ

---

### Введение

**Теплоемкостью** тела  $C$  называется отношение бесконечно малого количества тепла  $\delta Q$ , полученного телом, к соответствующему приращению  $dT$  его температуры.

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (1)$$

Когда масса тела равна единице, теплоемкость называют удельной и обозначают строчной буквой  $c$ . Молярная теплоемкость – теплоемкость моля вещества. Обычно эту величину обозначают заглавной буквой  $C$ .

Теплоемкость зависит от условий, в которых телу сообщается теплота, изменяя его температуру. Особое значение имеют теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении, обозначаемые символами  $C_v$  и  $C_p$ .

Для идеального газа справедливо уравнение Роберта Майера:

$$C_p - C_v = R, \quad (2)$$

и закон адиабатического процесса

$$pV^\gamma = const, \quad (3),$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, а постоянная адиабаты  $\gamma = C_p/C_v$ . Поэтому определение  $C_v$  и  $C_p$  сводится к измерению  $\gamma$ .

С точки зрения молекулярно-кинетической теории  $\gamma$  можно связать с количеством

степеней свободы молекулы  $i$ :  $\gamma = \frac{i+2}{i}$ .

---

### Цель работы

Измерение постоянной адиабаты

---

### Решаемые задачи

- ✓ наблюдение упругого резонанса газов
- ✓ определение постоянной адиабаты резонансным методом
- ✓ определение количества степеней свободы молекул предоставленных для изучения газов

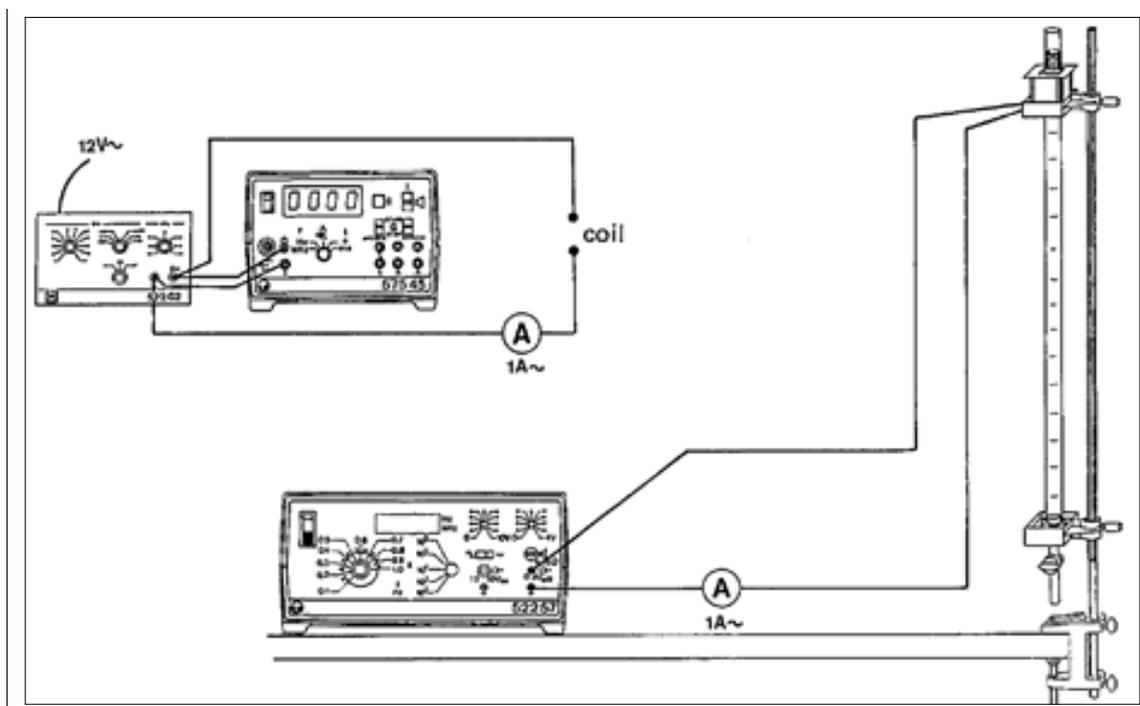
## Техника безопасности

- ✓ Внимание: в работе используется стекло.
- ✓ Будьте предельно аккуратны при работе с прибором по изучению упругого резонанса в газах;

## Экспериментальная установка

### Приборы и принадлежности

- ✓ Прибор для изучения упругого резонанса газов
- ✓ Счетчик S
- ✓ Функциональный генератор S12
- ✓ V-образный штатив, 20см
- ✓ Силиконовая подводка, 7ммØ
- ✓ Соединительные провода



Прибор для изучения упругого резонанса газов представляет собой стеклянную трубку, проградуированную в единицах объема, с площадью поперечного сечения  $S$ . В трубке колонна газа с переменным объемом  $V$  и давлением  $P$  находится в секции А между двумя магнитными грузами массам  $m$ . Для измерения постоянной адиабаты грузы в трубке раскачиваются переменным магнитным полем катушки индуктивности. При этом газ между ними периодически расширяется и сжимается. В силу малой теплопроводности газа этот процесс можно считать адиабатическим. Когда частота прикладываемого электромагнитного поля равна собственной частоте колебаний грузов:

$$v_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma PS}{mV}} \quad (4)$$

будет наблюдаться резонансное возрастание амплитуды колебаний. Определяя эту частоту, можно измерить  $\gamma$ .

Внутренний диаметр стеклянной трубки 14 мм,

внешний диаметр 18 мм,

длина 535 мм.

Магнитные грузы:  $8.8 \pm 0.26$  гр, диаметр 13.97 мм, длина 20 мм.

**Порядок выполнения работы:**

1. Электромагнит поместите в вершине трубки. Подайте на него ток не более 1А.
2. Откройте краны 1 и 2, осторожно переверните штатив с трубкой так, чтобы грузы попали в противоположный конец трубки.
3. Закройте краны. Расположите электромагнит рядом с грузами в верхнем положении трубки.
4. Плавно меняйте частоту импульсов тока, питающего электромагнит.
5. При совпадении частоты электрических импульсов и собственной частоты колебаний наблюдается резкое возрастание амплитуды колебаний грузов. Амплитуда колебаний должна составлять 5-7 делений. Запишите показания частоты и расстояния между грузами в таблицу.
6. Определите цену деления прибора. Для этого сравните шкалу прибора и рулетки.
7. По мере движения груза вниз перемещайте электромагнит за верхним грузом, определяйте новое значение резонансной частоты и расстояние между грузами. Полученные значения занесите в таблицу. Используйте результаты, когда расстояния между грузами на больше 3-4 см.

№	Частота $\nu$ (Гц)	Расстояние между грузами $h=V/S$ (м)	Показатель адиабаты

8. По измеренным значениям постройте зависимость  $\nu^2(1/h)$ .
9. По тангенсу угла наклона этой зависимости  $tg\alpha = \gamma = \frac{PS}{4\pi^2mh}$  рассчитайте величину адиабаты газа и сравните с табличной.
10. Выполните измерения для трех газов (воздух, гелий, углекислый газ).
11. Газ в трубку запускается инженером лаборатории.

## 215. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА И ИЗОХОРИЧЕСКОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА

---

### *Введение*

Коэффициентом Пуассона называется отношение изобарической и изохорической теплоемкостей

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

Этот коэффициент входит в уравнение адиабаты:

$$PV^\gamma = const$$

Для идеальных газов справедливо уравнение Майера:

$$C_P - C_V = R,$$

Измеряя значение  $\gamma$ , можно определить изохорическую теплоемкость идеального газа:

$$C_V = \frac{R}{\gamma - 1}.$$

Измерив  $\gamma$  и используя молекулярно-кинетическую теорию, можно рассчитать количество возбужденных при данной температуре степеней свободы молекулы  $i$ , так как:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i + 2}{i}.$$

Зная  $\gamma$ , можно определить среднее количество степеней свободы для молекул, входящих в состав воздуха.

---

### *Цель работы*

Измерение коэффициента Пуассона и определение изохорической теплоемкости воздуха

---

### *Решаемые задачи*

- ✓ Определение коэффициента Пуассона в рамках молекулярно-кинетической теории.
- ✓ Знакомство с теоретическими основами метода Клемана-Дезорма определения коэффициента Пуассона.
- ✓ Измерение коэффициента Пуассона.
- ✓ Определение количества степеней свободы, приходящихся на одну молекулу, входящих в состав воздуха.
- ✓ Измерение изохорической теплоемкости воздуха.

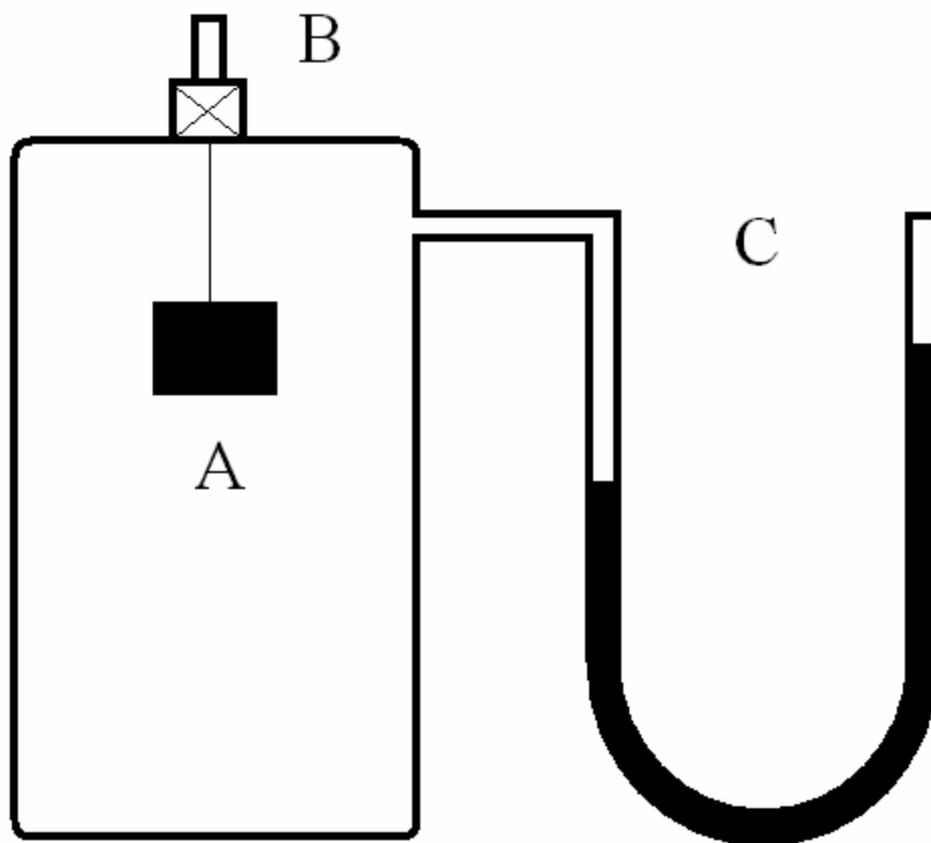


Рис 1. Схема экспериментальной установки по измерению коэффициента Пуассона

В дальнейших рассуждениях будем исходить из того, что воздух при комнатной температуре проявляет свойства идеального газа. Прибор Клемана-Дезорма показан на рисунке. Стеклоный баллон А с мешочком силикагеля для осушения воздуха внутри может сообщаться с атмосферой при помощи крана В. Манометр С служит для регистрации разности давлений в баллоне и атмосфере. Изначально при открытом кране В в сосуде А устанавливается атмосферное давление  $P_0$  и комнатная температура  $T_0$ . Если в сосуд А быстро закачать небольшое количество воздуха и закрыть кран, то давление и температура в сосуде повысятся. Благодаря теплопроводности стенок температура внутри сосуда через некоторое время сравняется с температурой окружающей среды, давление несколько понизится и станет равным:

$$p_1 = p_0 + h_1,$$

где  $h_1$  – давление, какое показывает манометр. Пусть это состояние газа с  $T_1=T_0$  и  $p_1$  первым.

После быстрого открытия крана воздух в сосуде А адиабатически расширится, давление станет равно атмосферному, а температура понизится до  $T_2$ . Это будет второе состояние с параметрами  $T_2$  и  $p_2=p_0$ . Таким образом, газ перейдет в третье состояние с параметрами  $T_3=T_0$  и

$$p_3 = p_0 + h_3$$

$h_3$  – давление, какое показывает манометр в третьей состоянии газа.

Законы идеального газа сформулированы лишь для неизменного его количества. Поэтому дальнейшие рассуждения будем проводить для некоторого мысленного выделенного объема газа, никогда не выходящего из баллона. Для этого объема с учетом того, что переход от первого состояния ко второму адиабатический, то

$$\frac{P_1^{\gamma-1}}{T_1^\gamma} = \frac{P_0^{\gamma-1}}{T_2^\gamma}$$

и от второго к третьему – изохорический процесс, то справедливо соотношение:

$$\frac{p_3}{T_1} = \frac{p_0}{T_2}.$$

Из уравнений (6) и (8) получим:

$$\left(\frac{p_0 + h_1}{p_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^\gamma \text{ или } \left(1 + \frac{h_1}{p_0}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{T_1 - T_2}{T_2}\right)^\gamma.$$

Если  $\frac{h_1}{p_0} \ll 1$  и  $\frac{T_1 - T_2}{T_1} \ll 1$ , то можно разложить обе функции в ряд и ограничиться

только двумя первыми слагаемыми, то

$$1 + (\gamma - 1) \frac{h_1}{p_0} = 1 + \gamma \frac{T_1 - T_2}{T_2},$$

откуда следует, что

$$p_0 \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} h_1.$$

Выражение, стоящее в левой части уравнения равно  $h_3$ , как следует из выражений (7) и (9):

$$p_3 = \frac{p_0 T_1}{T_2} = p_0 + h_3, \text{ отсюда } h_3 = p_0 \left( \frac{T_1}{T_2} - 1 \right) = \frac{\gamma - 1}{\gamma} h_1, \text{ тогда:}$$

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_3}.$$

То есть для определения коэффициента Пуассона достаточно знать высоту столба жидкости в манометре, если считать, что зависимость давления от высоты столба жидкости линейная.

---

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Проверить наличие воды в U – образном манометре. Открыть кран В и подождать 2-3 минуты. Аккуратно надеть резиновую грушу на штуцер крана В. Закачать воздух в сосуд А резким нажатием груши и перекрыть кран. Быстро повторить закачку, чтобы разность уровней  $h$  в манометре достигла 20-40 см.
2. Подождать, чтобы давление стабилизировалось в результате теплообмена (обычно 5-6 минут), и произвести отсчет  $h_1$ .
3. На короткое время открыть кран В, и быстро его закрыть сразу после того как прекратилось шипение вышедшего из баллона воздуха. Подождать, чтобы давление стабилизировалось. Произвести соответствующий отсчет  $h_3$ .
4. Повторить измерения по пунктам 1-3 не менее 8 раз.
5. По формуле (10) найти величину  $\gamma$  и оценить её погрешность, считая, что  $\gamma$  получена в результате прямого измерения.
6. Рассчитать по формулам (4) и (3) молярные теплоемкости воздуха  $C_V$  и  $C_P$ .
7. Вычислить по формуле (5) число степеней свободы молекулы воздуха.
8. Оценить количество атомов в молекуле воздуха.
9. Определите относительную погрешность измерений  $\gamma$  и  $C_V$ .

---

#### ***Контрольные вопросы и дополнительные задания***

1. Понятие теплоемкости. Значение изохорической теплоемкости.
2. Понятие числа степеней свободы молекулы.
3. Коэффициент Пуассона и его связь с числом степеней свободы молекулы.
4. Закон Майера.
5. Вывод рабочей формулы.
6. Нарисуйте качественно на одном поле координат графики газовых процессов, соответствующих каждой стадии эксперимента. Запишите соответствующие уравнения.
7. При каких условиях переход из первого состояния во второе можно считать адиабатическим?

8. Почему для стабилизации показаний манометра рекомендуется делать выдержку в течение нескольких минут? Что произойдет, если не придерживаться этой рекомендации?
9. Имеет ли значение соотношение объемов груши и баллона?
10. Каким требованиям должен удовлетворять баллон? (Объем, толщина, жесткость, цвет, прозрачность стенок, форма).

## 216. СКОРОСТЬ ЗВУКА В ГАЗАХ

### Введение

Звук — физическое явление, представляющее собой распространение в виде упругих волн механических колебаний в твёрдой, жидкой или газообразной среде. Рассмотрим процесс распространения звука в газе. Пусть упругая звуковая волна распространяется в цилиндре с площадью поперечного сечения  $S$ . Тогда со скоростью  $v$  распространяется относительная деформация  $\varepsilon = \Delta l / l$ . Пусть плотность недеформированной среды  $\rho = m / lS$ ,  $l$  — длина рассматриваемой части. Плотность в области сжатия равна  $\rho + \Delta\rho = \frac{m}{(l - \Delta l)S} = \frac{m(l + \Delta l)}{(l^2 - \Delta l^2)S}$ . Если  $\Delta l \ll l$ , то  $\rho + \Delta\rho \approx \frac{m}{lS} + \frac{m\Delta l}{lS} = \rho + \rho \frac{\Delta l}{l}$ . Отсюда следует, что изменение плотности равно  $\Delta\rho = \rho\varepsilon$ . За время  $dt$  через поперечное сечение область сжатия пройдет расстояние  $dx = vdt$ . Изменение массы на расстоянии  $dx$  равно  $dm = \Delta\rho \cdot S \cdot dx = \rho \cdot \varepsilon \cdot S \cdot v \cdot dt$ . Изменение импульса равно  $dm \cdot v = \rho \cdot \varepsilon \cdot S \cdot v^2 \cdot dt$ . С другой стороны по второму закону Ньютона изменение импульса равно произведению действующей на нее силы упругости и времени её действия. По закону Гука сила упругости равна:

$$F = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \cdot S. \quad (1),$$

где  $E$  — модуль упругости. Тогда  $F \cdot dt = E \cdot \varepsilon \cdot S \cdot dt$ . Приравнявая изменение импульса  $E \cdot \varepsilon \cdot S \cdot dt = \rho \cdot \varepsilon \cdot S \cdot v^2 \cdot dt$ , получаем, что скорость звука в гладкой прямолинейной трубе с постоянным поперечным сечением равна  $v = \sqrt{E/\rho}$ .

Определим величину модуля упругости для газа. При действии силы  $F$  на некоторый объем газа  $V$ , давление изменяется на величину  $\Delta P = E \cdot \Delta V / V$ . Если изменения объема и давления бесконечно малые, то можно выразить модуль упругости в газе в виде:

$$E = - \frac{dP}{dV/V},$$
 где знак минус означает, что уменьшение объема соответствует увеличению

давления.

Если в газе распространяется звуковая волна, то колебания плотности происходят так быстро, что теплообмен не успевает произойти, поэтому можно использовать уравнение Пуассона  $P \cdot V^\gamma = const$ . Продифференцируем это уравнение, получим, что

$V^\gamma \cdot dP + \gamma \cdot P \cdot V^{\gamma-1} \cdot dV = 0$ . Отсюда следует, что  $\frac{dP}{dV/V} = -\gamma \cdot P$ . Тогда модуль

упругости в газе равен  $E = \gamma \cdot P$ . Подставим в полученную формулу для модуля упругости давление, выраженное из закона Менделеева-Клапейрана, получим, что:

$$E = \gamma \cdot \frac{m}{M} \cdot \frac{RT}{V} = \gamma \cdot \frac{\rho \cdot RT}{M}. \text{ С другой стороны } E = v^2 \cdot \rho.$$

Тогда фазовая скорость звуковых волн в газе равна:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}. \quad (2),$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура,  $M$  – молярная масса,  $\gamma$  – показатель адиабаты воздуха. В отсутствии заметного затухания звука фазовая скорость практически равна скорости распространения звукового импульса.

Преобразуя формулу (2), найдем значение показателя адиабаты:

$$\gamma = \frac{Mv^2}{RT}. \quad (3)$$

Таким образом, для определения показателя адиабаты достаточно измерить температуру газа и скорость распространения звука. Звуковая волна, распространяющаяся вдоль трубы, испытывает многократные отражения от торцов. Если длина трубы равна целому числу полувольт, то волна, отраженная от заднего торца трубы, и падающая совпадают по фазе. Совпадающие по фазе волны усиливают друг друга. Амплитуда звуковых колебаний при этом резко возрастает – наступает резонанс. Скорость звука  $v$  связана с частотой и длиной волны соотношением:

$$v = \lambda f. \quad (4)$$

При постоянной длине трубы можно менять частоту звуковых колебаний, следовательно, длину звуковой волны.

$$v = 2L(f_{n+1} - f_n), \quad (5),$$

где  $L$  – длина трубы. Температура газа измеряется термопарой.

---

### *Цель работы*

Знакомство с методом измерения скорости звуковых импульсов.  
Определение показателя адиабаты.

---

### *Решаемые задачи*

✓ Измерение скорости звукового импульса в предложенных газах.

- ✓ Измерение температурной зависимости скорости распространения звуковых импульсов в воздухе.
  - ✓ Измерение показателя адиабаты.
- 

### *Техника безопасности*

- ✓ Внимание: в работе используется стекло.
  - ✓ Будьте предельно аккуратны при работе с оборудованием для определения скорости звука;
- 

### *Экспериментальная установка*

#### *Приборы и принадлежности*

- ✓ Сенсор-CASSY
- ✓ CASSY Lab 2
- ✓ Timer box
- ✓ Оборудование для определения скорости звука
- ✓ Источник питания для нагревателя
- ✓ Штатив для трубок и катушек
- ✓ Высокочастотный динамик
- ✓ Микрофон
- ✓ Металлический рельс со шкалой, 0,5 м
- ✓ Седлообразные подставки
- ✓ Баллоны с газами
- ✓ Точно отрегулированный клапан для баллонов с газом
- ✓ Силиконовая трубка, 7 x 1,5 мм, 1 м
- ✓ Резиновая трубка,  $d = 4$  мм
- ✓ Соединительные провода

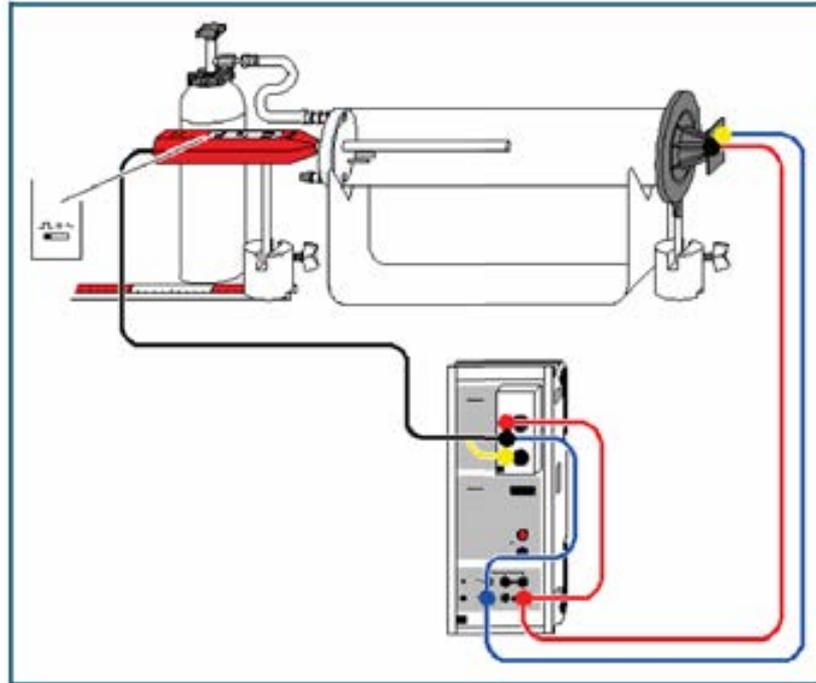


Рис.1

Звуковой импульс генерируется за счет подачи импульса напряжения с SensorCASSY на высокочастотный динамик. Звук динамика, фиксируется микрофоном, находящимся на некотором расстоянии  $s$  от динамика. С помощью датчика Timerbox, подключенного к SensorCASSY можно зафиксировать время  $\tau$  после подачи импульса напряжения и поступлением сигнала с микрофона.

---

### *Порядок выполнения работы*

#### **Подготовка установки к работе**

1. Проверьте правильность сборки электрической схемы (см рис 1)
2. При использовании нагревателя проверьте его подключение к источнику питания.
3. Установите динамик возможно более близко к трубе прибора для определения скорости звука
4. Установите микрофон так, чтобы он только максимально глубоко входил в полость трубы
5. Загрузите настройки CASSY с Рабочего стола
6. Проведите пробное измерение, нажав F9

### **Упражнение 1. Калибровка прибора**

1. Отметьте на линейке положение подставки микрофона  $x_0$ . Зайдите в Window → Show settings. Выберите Calculator → Parameter → Path  $s$ . Внесите значение  $x_0$  в соответствующий столбец на экране в закладке “Value”.
2. Зайдите в Displays → Standart. Выберите ось  $x \rightarrow \Delta t$ ; ось  $y \rightarrow s$ .
3. Нажав F9 или кнопку , запустите измерение времени  $\tau_0$
4. Переместите микрофон, измерьте и внесите в таблицу новую его координату  $x_1$
5. Нажав F9 или кнопку , запустите измерение времени  $\tau_1$
6. Выдвигая микрофон все дальше, поведите 5-6 измерений  $x_i$  и  $\tau_i$ .
7. По тангенсу угла наклона определите скорость звука  $v$ .
8. Теперь определите точное расстояние  $L$  от микрофона до динамика. Для этого нажмите F9 и измерьте время прохождения импульса и умножьте его на  $v$ .
9. В ветви “Calculator” окна настроек (“Parameter → Path  $s$ ”) CASSY введите значение  $L$  для соответствующей переменной. В дальнейшем не перемещайте ни динамик, ни микрофон.
10. По формуле (2) вычислите показатель адиабаты  $\gamma$  для воздуха и сравните с табличным значением.

### **Упражнение 2. Измерение зависимости скорости звука от температуры**

1. В окне программы слева откройте закладку  $v(T)$
2. Включите блок питания нагревателя
3. По мере увеличения температуры через 5 градусов фиксируйте скорость звука нажатием клавиши F9.
4. Сделайте вывод о зависимости  $v(T)$ . Постройте зависимость скорости звука от температуры.
5. По формуле (3) определите показатель адиабаты  $\gamma$  для каждой температуры. Постройте график зависимости показателя адиабаты от температуры.

### **Упражнение 3. Измерение скорости звука в различных газах**

1. Заполните полость прибора исследуемым газом, с помощью камеры.
2. Повторите пп 1-5 упражнения 2.
3. Определите показатель адиабаты.
4. Из показателя адиабаты определите число степеней свободы молекулы и сделайте вывод о связи структуры молекул газа и скорости звука в нем.

## 217. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ДЖОУЛЯ-ТОМСОНА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ

### Введение

Уравнения состояния реальных газов должно учитывать конечное значение собственного объема молекул и взаимное притяжение их друг к другу. Ван-дер-Ваальс предложил в уравнения состояния для одного моля реального газа включить не объем сосуда, а объем не занятый молекулами, т.е. величину  $(V_m - b)$ , где  $V_m$  – молярный объем. Постоянная  $b$  определяет ту часть объема, которая недоступна для движения молекул вследствие их конечного размера. Для нахождения величины  $b$  предположим, что в сосуде имеются лишь две молекулы, центры которых не могут сблизиться на расстояние, меньше  $\sigma$ . Таким образом, для центра каждой молекулы недоступным оказывается объем шара радиусом  $\sigma$ , равный  $\frac{4}{3}\pi\sigma^3$ , а в расчете на одну молекулу – объем, вдвое меньший. Исходя из этого примерного расчета, недоступный объем для  $N_A$  молекул

$$b = \frac{2}{3} N_A \pi \sigma^3. \quad (1)$$

Окружим каждую молекулы сферой молекулярного действия. Если эта сфера находится внутри газа, то силы, действующие на рассматриваемую молекулу со стороны окружающих молекул, в среднем уравниваются. Но этого не произойдет, если молекула находится вблизи газа со стенкой. Появляется избыток молекул, тянущих рассматриваемую молекулу внутрь газа, над молекулами, тянущими ее наружу. Таким образом, вблизи стенки возникает пристеночный слой газа, толщина которого равна радиусу сферы молекулярного действия. Вследствие притяжения ударяющих о стенку молекул всеми остальными молекулами газа давление, оказываемое газом на стенку, уменьшается на величину  $p_i$ .  $p_i$  называется внутренним или молекулярным давлением. Поскольку силы взаимодействия молекул очень быстро убывают с расстоянием, то следует учитывать притяжение одного лишь соседнего слоя. Сила этого притяжения (рассчитанная на единицу площади) пропорциональна концентрации молекул в обоих слоях или обратно пропорциональна объему газа  $P_i \sim \frac{N}{V} \frac{N}{V}$ . Введя коэффициенты пропорциональности можно перейти к равенству для одного моля газа:

$$p_i = \frac{a}{V^2}, \quad (2)$$

где  $a$  – постоянная, характерная для рассматриваемого газа. Тогда уравнение состояния для моля газа Ван-дер-Ваальса будет иметь вид:

$$\left( p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT. \quad (3)$$

**Внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса** состоит из двух частей: кинетической энергии поступательного и вращательного движения молекул  $E_K$  и потенциальной энергии их взаимодействия  $E_D$ . Предполагая, что к реальному газу по-прежнему применима теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы, можно для расчета  $E_K$  воспользоваться формулой, полученной для одного моля идеального газа:

$$E_k = \frac{iR}{2}T = C_V T. \quad (4)$$

Потенциальная энергия взаимодействия молекул определяется следующим образом. При расширении газа силы внутреннего или молекулярного давления  $p_i = \frac{a}{V^2}$  совершает работу, которая равна

$$E_{II} = A = \int p_i dV = \int \frac{a}{V^2} dV = -\frac{a}{V}. \quad (5)$$

Окончательно, внутренняя энергия одного моля реального газа равна:

$$U = C_V T - \frac{a}{V}. \quad (6)$$

Прохождение газа через пористую перегородку (адиабатическое дросселирование) в теплоизолированной трубе сопровождается расширением и изменением температуры газа (эффект Джоуля-Томсона). Если до расширения газ считать ван-дер-ваальсовским, а после расширения – идеальным, то температура газа или уменьшается или возрастает. Рассмотрим прохождение одного моля газа через перегородку. Процесс будем считать адиабатическим. (Это интегральный эффект Джоуля-Томсона).

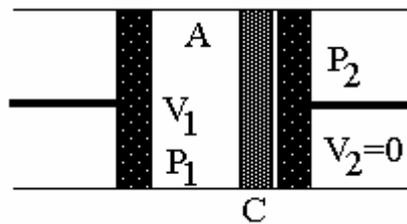


Рис.1а

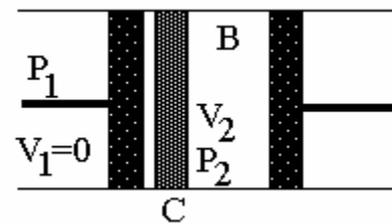


Рис.1б

На рисунке изображена схема расширения газа в адиабатических условиях. На рис.1а – начальное состояние системы, на рис.1б – конечное. В середине цилиндра, помещенного в адиабатическую оболочку, находится перегородка С (узкая щель, пористое тело, дроссель и т.п.), препятствующая быстрому прохождению газа. Из части 1 поршнем через перегородку продавливается газ, в результате чего объем газа меняется от  $V_1$  до нуля. При этом в части 2 перемещается поршень, и объем газа при постоянном давлении изменяется от нуля до  $V_2$ . Так как величины давления  $p_1$  и  $p_2$  постоянны, то в части 1 газ совершает работу  $A_1 = -p_1 V_1$ , а в части 2  $A_2 = p_2 V_2$ . Будем считать, что внутренняя энергия системы изменилась на величину  $U_2 - U_1$ .

Запишем для этого процесса первое начало термодинамики

$$Q = U_2 - U_1 + p_2 V_2 - p_1 V_1.$$

Так как процесс адиабатический ( $Q=0$ ), то имеем

$$U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2.$$

Для одного моля реального газа

$$U_1 = C_V T_1 - \frac{a}{V_1}; \quad p_1 V_1 = \frac{RT_1 V_1}{V_1 - b} - \frac{a}{V_1}.$$

Для одного моля идеального газа

$$U_2 = C_V T_2; \quad p_2 V_2 = RT_2.$$

$$C_V T_1 - \frac{a}{V_1} + \frac{RT_1 V_1}{V_1 - b} - \frac{a}{V_1} = C_V T_2 + RT_2.$$

Преобразуем выражение следующим образом:

$$\frac{RT_1 V_1}{V_1 - b} = \frac{RT_1 (V_1 - b + b)}{V_1 - b} = RT_1 + \frac{RT_1 b}{V_1 - b},$$

$$C_V T_1 + RT_1 + \frac{RT_1 b}{V_1 - b} - \frac{2a}{V_1} = C_V T_2 + RT_2.$$

Отсюда следует, что:

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{(C_V + R)} \left( \frac{RT_1 b}{V_1 - b} - \frac{2a}{V_1} \right) \text{ или}$$

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{C_P} \left( \frac{RT_1 b}{V_1 - b} - \frac{2a}{V_1} \right). \quad (7)$$

Из этого условия ясно, что расширение реального газа без теплообмена должно сопровождаться изменением его температуры. Температура реальных газов в таком процессе может, как понижаться:  $\Delta T < 0$  (положительный эффект Джоуля-Томсона), так и повышаться:  $\Delta T > 0$  (отрицательный эффект Джоуля-Томсона). Температура, при которой происходит изменение знака эффекта Джоуля-Томсона, называется температурой инверсии:

$$T_i = \frac{2a}{Rb}. \quad (8)$$

Газ, имеющий температуру выше температуры инверсии, нагревается, ниже – охлаждается. Температура инверсии зависит от давления и свойств газа, поэтому при одной и той же температуре некоторые газы могут нагреваться, а другие охлаждаться. Например, при комнатной температуре и невысоком давлении воздух при адиабатическом дросселировании в процессе Джоуля-Томсона охлаждается, тогда, как для достижения такого же эффекта водород следует охладить до 200К, а гелий до 40К.

### **Цель работы**

Наблюдение эффекта Джоуля – Томпсона для различных газов

### **Решаемые задачи**

- ✓ Измерение временной зависимости разности температур между двумя камерами при различных давлениях.
- ✓ Определения времени релаксации.

---

## **Экспериментальная установка**

### **Приборы и принадлежности**

- ✓ Баллоны со сжатым газом
- ✓ V-образное основание штатива, 28 см.
- ✓ Штативный стержень, 47 см
- ✓ Универсальный зажим I
- ✓ Воздушный дроссель для наблюдения эффекта Джоуля –Томсона
- ✓ Сенсор - CASSY Lab2
- ✓ Устройство измерения температуры (NiCr-Ni, NTC)
- ✓ Датчик давления S,  $\pm 2000$  гПа
- ✓ Стальной газовый баллон с углекислотой
- ✓ Стальной газовый баллон с азотом
- ✓ Газовый редуктор
- ✓ Газовый редуктор (азот)
- ✓ Стальной ключ 30/32 мм, для газовых баллонов
- ✓ Термопара NiCr-Ni
- ✓ Универсальный зажим, 0-80 мм
- ✓ Хомуты для трубок 10-16 мм (10 шт.)
- ✓ Вакуумная резиновая подводка,  $\varnothing$  8 мм
- ✓ Специализированный ноутбук для использования в лабораторных установках LD

### **Требования безопасности при использовании газовых баллонов**

- ✓ **Будьте осторожны при обращении с газовым баллоном**
- ✓ **Баллоны находятся под давлением;**
- ✓ **Защитите баллоны от солнечного света или нагревания более чем на 50 °С.**
- ✓ **Не применяйте силу, чтобы открыть баллоны.**
- ✓ **Работа выполняется в присутствии преподавателя или инженера**



Рис. 3. Общая схема установки для исследования эффекта Джоуля – Томсона. (1) Ноутбук, (2) Сенсор - CASSY Lab2, (3) Воздушный дроссель для наблюдения эффекта Джоуля –Томсона  
Газ в камере 1 имеет постоянное давление  $P_1$ . Газ будет проходить через мембрану (медленный процесс без турбулентности) в камеру 2 с постоянным давлением  $P_2$  ( $P_2 < P_1$ ). С помощью двух термопар можно измерить разность температур в камерах 1 и 2.

---

#### *Порядок выполнения работы*

##### **Выполнение измерений**

1. Подключите Cassy Lab2, загрузите соответствующий файл настроек. (Data(D)/Рабочая папка/217\_effect\_3\_1.labx)
2. Подавайте в камеру 1 газ из баллона  $\text{CO}_2$ , поворачивая вентиль. Давление установлено на 1500 гектопаскаль;
3. Запустите измерения температур в камерах и разность температур и давления в зависимости от времени в Cassy Lab2, нажав F9. Постройте графики зависимости давления  $p$ , температур в камерах  $T_1$  и  $T_2$ , и разности температур  $\Delta T$ . Повторите измерения три раза.
4. По графикам определите время релаксации. Временем релаксации называется время, за которое амплитуда сигнала уменьшится в  $e$  раз.
5. Повторите измерения 2-4 для газа гелия.
6. Проанализируйте полученные результаты, объясните повышение и понижение температуры во второй камере прибора Джоуля-Томсона для разных газов.

## 218. ВОДОСТРУЙНЫЙ ВАКУУМНЫЙ НАСОС

### Введение

#### Принцип работы водоструйного вакуумного насоса

С помощью водоструйного насоса можно получать давления порядка 10 мм.рт.ст.

Устройство водоструйного насоса показано на рис. 1. В герметичную камеру насоса входят три трубки. Струя воды подается в трубку А, в которой имеется сужение, вставленное с небольшим зазором в воронку другой трубки (В), через которую вода уходит из насоса. Откачиваемый объем соединяется с камерой через трубку С.

Для понимания действия насоса необходимо знать закон Бернулли и уравнение непрерывности тока для идеальной жидкости.

#### Закон Бернулли

Закон (уравнение) Бернулли является следствием закона сохранения энергии для стационарного потока идеальной (то есть без внутреннего трения) несжимаемой жидкости вдоль любой трубки тока:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $v$  – скорость движения жидкости,  $g$  – ускорение свободного

падения,  $h$  – высота над поверхностью Земли. Слагаемое  $\frac{\rho v^2}{2}$

представляет собой объемную плотность кинетической энергии,  $\rho gh$  – потенциальной энергии в поле внешних сил, а  $p$  – потенциальной энергии упругой деформации (давление). Их сумма определяет полную энергию единицы объема жидкости, которая в отсутствии диссипации является постоянной величиной в различных поперечных сечениях трубки тока. Константа в правой части часто называется полным давлением и зависит, в общем случае, от линии тока.



Рис. 1. Устройство водоструйного насоса



Даниил Бернулли (1700—1782)

Полное давление состоит из весового ( $\rho gh$ ), статического ( $p$ ) и динамического ( $\frac{\rho v^2}{2}$ ) давлений.

Из закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения потока, из-за возрастания скорости, то есть динамического давления, статическое давление падает.

### **Уравнение непрерывности тока идеальной жидкости**

Уравнение непрерывности тока несжимаемой жидкости выглядит так:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2. \quad (2)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади поперечных сечений трубки тока,  $v_1$  и  $v_2$  – скорости жидкости в этих сечениях.

Если высота сечений трубки тока меняется на небольшую величину, а их диаметры сильно отличаются (как это имеет место в нашем случае), можно пренебречь изменением потенциальной энергии в поле силы тяжести и использовать уравнение (1) в виде:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2. \quad (3)$$

Из (2) следует, что при переменном сечении трубки тока жидкость движется с ускорением. Согласно уравнению (3) это ускорение обусловлено непостоянством давления вдоль трубки – в местах, где скорость меньше, давление больше, что приводит к ускорению жидкости при перетекании ее в узкие места трубки тока.

Принцип действия насоса состоит в том, что вода, двигаясь с большой скоростью в узком отверстии верхней трубки (см. рис. 1 и уравнение (2)), увлекает за собой воздух из зазора между трубками. Так как прилегающие к струе слои воздуха движутся, давление в них (см. уравнение (3)) падает, что вызывает приток воздуха в зазор из камеры. Давление в камере уменьшается. С точки зрения гидродинамики процесс откачки прекратится, когда давление в камере станет равным давлению в струе жидкости, которое тем меньше, чем больше скорость струи.

### **Зависимость давления насыщенного пара воды от температуры**

Если при данных значениях температур и давления относительные количества пара и жидкости не меняются, то такой пар называют насыщенным. Связь давления насыщенного пара и температуры определяется уравнением Клапейрона-Клаузиуса. Из него, с учетом уравнения состояния идеального газа, а также того, что в условиях далеких от критических, объем жидкости на несколько порядков меньше объема газа, следует:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{TV} = \frac{LP}{T^2 R} \quad (4)$$

Интегрируя последнее уравнение в предположении, что  $L$  не зависит от температуры, получаем.

$$\ln P = -\frac{L}{TR} + C \text{ ,} \quad (5)$$

где  $C$  – константа, характерная для данной жидкости.

Тангенс угла наклона графика этой зависимости, построенной в координатах  $\ln P$   $1/T$ , очевидно равен  $L/R$ . Значит, из изменений температурной зависимости давления насыщенного пара данного вещества можно определить значение его скрытой молярной теплоты испарения  $L$ .

Удельная теплота парообразования и конденсации ( $L$ ) — физическая величина, характеризующая количество теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг вещества, взятому при температуре кипения, чтобы перевести его из жидкого состояния в газообразное, равна теплоте, выделяемой при конденсации пара, взятого при температуре кипения, в жидкость.

Таблица 1. Давление насыщающего водяного пара  $P$  в зависимости от температуры

t, °C	P, кПа								
0,00	0,61	8,00	1,07	16,00	1,80	24,00	2,96	32,00	4,71
0,50	0,63	8,50	1,11	16,50	1,87	24,50	3,04	32,50	4,84
1,00	0,65	9,00	1,15	17,00	1,92	25,00	3,13	33,00	4,99
1,50	0,68	9,50	1,17	17,50	1,95	25,50	3,23	33,50	5,12
2,00	0,71	10,00	1,21	18,00	1,99	26,00	3,33	34,00	5,27
2,50	0,73	10,50	1,27	18,50	2,08	26,50	3,43	34,50	5,41
3,00	0,76	11,00	1,31	19,00	2,17	27,00	3,53	35,00	5,57
3,50	0,79	11,50	1,35	19,50	2,24	27,50	3,64	35,50	5,73
4,00	0,81	12,00	1,39	20,00	2,32	28,00	3,75	36,00	5,89
4,50	0,84	12,50	1,44	20,50	2,39	28,50	3,85	36,50	6,05
5,00	0,87	13,00	1,48	21,00	2,47	29,00	3,96	37,00	6,23
5,50	0,89	13,50	1,53	21,50	2,53	29,50	4,08	37,50	6,40
6,00	0,93	14,00	1,59	22,00	2,61	30,00	4,20	38,00	6,57
6,50	0,96	14,50	1,64	22,50	2,69	30,50	4,32	38,50	6,74
7,00	1,00	15,00	1,69	23,00	2,79	31,00	4,45	39,00	6,93
7,50	1,03	15,50	1,75	23,50	2,87	31,50	4,57	39,50	7,12

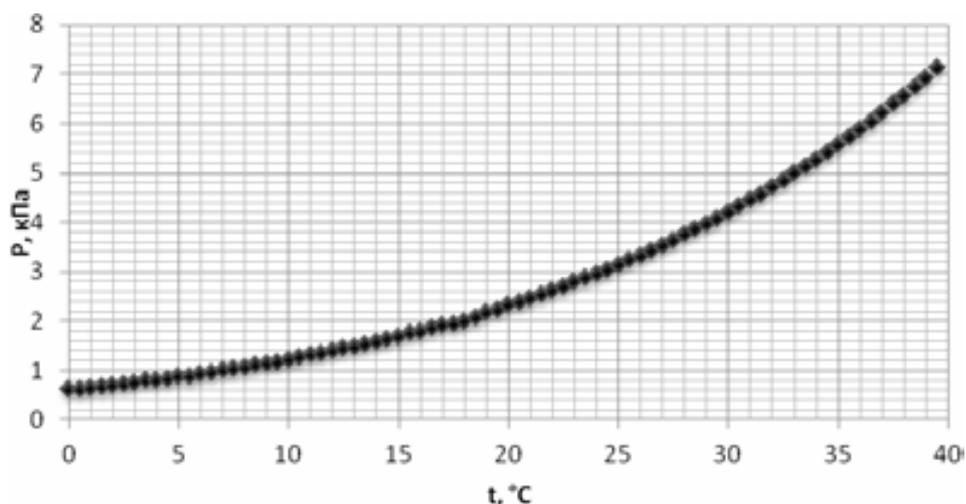


Рис. 2. График зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры

---

### *Цель работы*

Знакомство с физическими принципами работы и устройством водоструйного насоса.

---

### *Решаемые задачи*

- ✓ освоение приемов работы с водоструйным насосом;
- ✓ исследование зависимости скорости откачки от начального давления воды на входе насоса;
- ✓ исследование влияния температуры воды на уровень вакуума.

---

### *Техника безопасности*

- ✓ Внимание: в работе используется стекло.
- ✓ Будьте предельно аккуратны при работе с жидкостями при высокой температуре.

---

### *Экспериментальная установка*

#### *Приборы и принадлежности*

- ✓ вентиль
- ✓ манометр
- ✓ пластиковый водоструйный насос
- ✓ стеклянный тройник
- ✓ стеклянный вакууммируемый сосуд с двумя горлышками
- ✓ термopара
- ✓ вакуумметр Cassy
- ✓ блок Cassy
- ✓ персональный компьютер
- ✓ трубки резиновые вакуумные
- ✓ держатель
- ✓ CASSY Lab 2

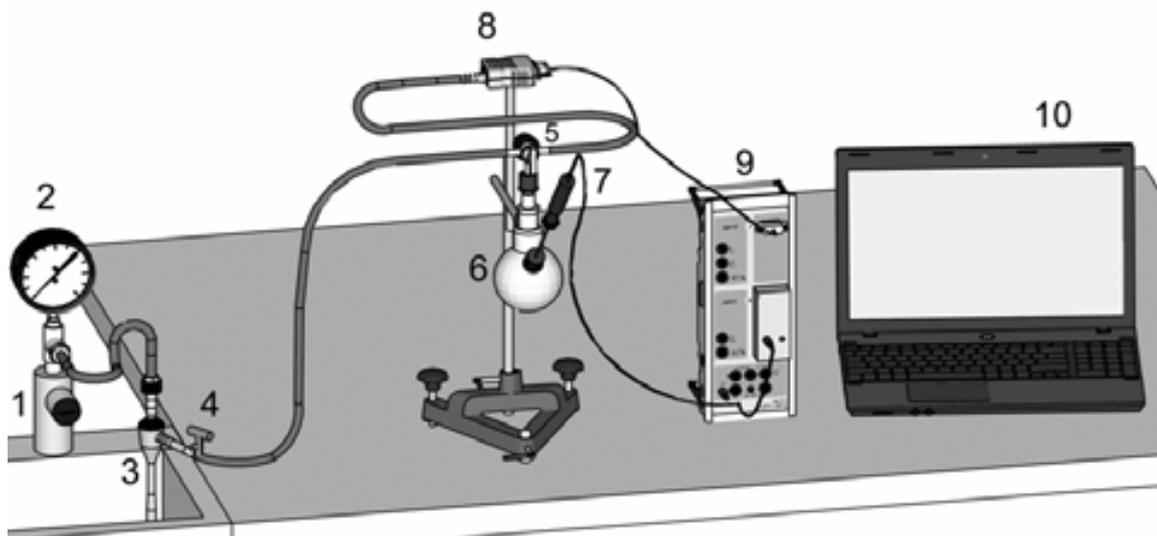


Рис.3 Экспериментальная установка для исследования работы водоструйного вакуумного насоса

В работе необходимо исследовать зависимость скорости откачки воздуха от начального давления воды на входе насоса и изучение влияния температуры воды на уровень вакуума.

Схема установки представлена на рис. 3. Вода через вентиль (1) и манометр (2) подается в пластиковый водоструйный насос (3) и сливается в раковину. Отсасывающий штуцер насоса подсоединен к крану (4) и к тройнику (5), соединённым с вакууммируемым сосудом (6) с двумя горлышками. Боковое гнездо закрыто пробкой с термопарой (7).

Давление в этом сосуде контролируется с помощью вакуумметра (8). Показания термопары и вакуумметра передаются на блок Cassy (9) и затем на персональный компьютер (10).

---

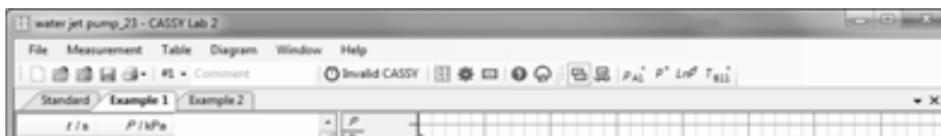
### *Порядок выполнения работы*

#### **Подготовка установки к работе**

1. Проверьте, что сосуд без жидкости герметично соединен с водоструйным насосом и вакуумметром через стеклянный тройник с помощью резиновых вакуумных трубок (см рис 3)
2. Конец термопары должен быть вставлен в пробку на боковом гнезде сосуда
3. Запустите на компьютере программу Cassy Lab 2.

**Упражнение 1. Снятие зависимости скорости откачки воздуха от начального давления воды на входе насоса**

1. Запустите на компьютере программу Cassy Lab 2. Перейдите в закладку «Example 1»:



2. Откройте кран (4).
3. Убедитесь, что тройной кран перекрывает связь с атмосферой. Плавно откройте вентиль крана и установите на манометре давление воды  $P_{\text{вх.н.}} = 250$  кПа.
4. Закройте кран (4) и сразу нажмите клавишу F9 на компьютере для начала измерений. На экране появятся результаты измерения времени откачки воздуха  $t_{\text{отк}}$  и давления  $P$  в сосуде. Продолжайте измерения, пока давление в сосуде не достигнет минимального наблюдаемого значения. Обратите внимание, что в процессе откачки давление воды на манометре уменьшается. Регулировать это уменьшение не следует. Для завершения измерений нажмите клавишу F9.
5. После измерения закройте вентиль крана (1). Поверните тройной кран так, чтобы и давление в сосуде стало атмосферным. Закройте тройной кран.
6. Пронаблюдайте на экране компьютера график зависимости  $P_{\text{вх.н.}}(t_{\text{отк}})$ .
7. Откройте кран (4).
8. Повторите измерения, каждый раз уменьшая давление  $P_{\text{вх.н.}}$  на 20 кПа до 100 кПа.
9. Объясните полученные результаты.

**Упражнение 2. Изучение влияния температуры воды на уровень ва-куума**

1. В программе Cassy Lab 2 перейдите в закладку «Example 2».
2. Отсоедините колбу от вакуумной системы.
3. Осторожно налейте в колбу кипяток (предварительно ополос-нув) так, чтобы кончик термопары погрузился в него.
4. Подсоедините колбу к вакуумной системе.
5. Включите откачку колбы, установив входное давление воды около 250 кПа, дождитесь закипания воды в колбе.
6. Нажмите клавишу F9 на компьютере для начала измерений. На экране появятся результаты измерения температуры  $T$  и давления  $P_{\text{кам}}$  в сосуде.
7. Измерьте зависимость давления  $P_{\text{кам}}$  от температуры воды  $T$  в колбе по мере остывания до комнатной температуры.
8. Пронаблюдайте на экране компьютера график зависимости  $P_{\text{кам}}(T)$ .

9. Сравните полученные данные с зависимостью давления насыщенного пара воды от температуры по справочным данным (Таблица 1, Рис. 2). Поверните тройной кран так, чтобы давление в сосуде стало атмосферным.

## Контрольные вопросы и дополнительные задания

### 211. Исследование броуновского движения

1. Как оценить размер молекул?
2. Сколько молекул вытесняется наблюдаемой броуновской частицей?
3. Почему увеличение размера броуновской частицы приводит к замедлению их движения?
4. Как влияет изменение температуры на броуновское движение?
5. Понятие флуктуации. Флуктуации плотности и температуры.
6. Вывод выражения Эйнштейна –Смолуховского для перемещения броуновской частицы.

### 212. Определение кинематических характеристик молекул газа

1. Что такое средняя длина свободного пробега молекул и от чего она зависит?
2. Как средняя скорость движения молекул зависит от температуры?
3. Объясните происхождение силы внутреннего трения, исходя из представлений молекулярно-кинетической теории.
4. Дайте определение коэффициента вязкого трения.
5. Рассмотрите процессы переноса
6. Как зависит коэффициент вязкости жидкости, газа от температуры при постоянном давлении?
7. Как изменяется коэффициент вязкости жидкости, газа от давления при постоянной температуре?
8. Что называют ламинарным (турбулентным) течением жидкости?
9. Закон Пуазейля. Как меняется скорость движения молекул газа, жидкости от стенки к оси капилляра?
10. Укажите возможные причины, почему экспериментальные значения коэффициента вязкости воздуха отличается от указанного в справочной таблице.

### 2131. Зависимость объёма газа от температуры при постоянном давлении (закон Гей-Люссака)

### 2132. Зависимость давления газа от объёма при постоянной температуре (закон Бойля-Мариотта)

### 2133. Зависимость давления газа от температуры при постоянном объёме (закон Шарля)

1. Что такое средняя длина свободного пробега молекул и от чего она зависит?
2. Как средняя скорость движения молекул зависит от температуры?
3. Представления молекулярно-кинетической теории.
4. Гипотеза Больцмана.
5. Степени свободы молекулы.
6. Давление газа о стенку. Вывод формулы из представлений молекулярно-кинетической теории.
7. Уравнение Менделеева-Клайперона.
8. Изотермические, изохорические, изобарические, адиабатические процессы.

### 214. Определение показателя адиабаты $C_p/C_v$ разных газов с использованием прибора по изучению упругого резонанса газов

1. Понятие удельной и молярной теплоемкости. В каких единицах измеряется

теплоемкость?

2. Какова связь между  $c_p$ ,  $c_v$  и числом степеней свободы молекул газа?
3. Поступательные, вращательные, колебательные степени свободы.
4. Уравнение Роберта Майера.
5. Первое начало термодинамики.
6. Изотермические, изохорические, изобарические, адиабатические процессы.
7. Вывести уравнение Пуассона
8. Связь между показателем адиабаты  $\gamma$  и степенями свободы молекулы.
9. Как изменятся результаты эксперимента при наличии паров воды?

## **215. Измерение коэффициента Пуассона и изохорической теплоемкости воздуха**

1. Понятие теплоемкости. Значение изохорической теплоемкости.
2. Понятие числа степеней свободы молекулы.
3. Коэффициент Пуассона и его связь с числом степеней свободы молекулы.
4. Закон Майера.
5. Вывод рабочей формулы.
6. Нарисуйте качественно на одном поле координат графики газовых процессов, соответствующих каждой стадии эксперимента. Запишите соответствующие уравнения.
7. При каких условиях переход из первого состояния во второе можно считать адиабатическим?
8. Почему для стабилизации показаний манометра рекомендуется делать выдержку в течение нескольких минут? Что произойдет, если не придерживаться этой рекомендации?
9. Имеет ли значение соотношение объемов груши и баллона?
10. Каким требованиям должен удовлетворять баллон? (Объем, толщина, жесткость, цвет, прозрачность стенок, форма).

## **216. Скорость звука в газах**

1. Понятие удельной и молярной теплоемкости. В каких единицах измеряется теплоемкость?
2. Какова связь между  $c_p$ ,  $c_v$  и числом степеней свободы молекул газа?
3. Поступательные, вращательные, колебательные степени свободы.
4. Уравнение Роберта Майера.
5. Первое начало термодинамики.
6. Изотермические, изохорические, изобарические, адиабатические процессы.
7. Вывести уравнение Пуассона
8. Связь между показателем адиабаты  $\gamma$  и степенями свободы молекулы.
9. Как изменятся результаты эксперимента при наличии паров воды?

## **217. Исследование эффекта Джоуля-Томсона для различных газов**

- 1) Газ Ван-дер-Ваальса.
- 2) Изотермы газа Ван-дер-Ваальса и реального газа. Критическая точка.
- 3) Внутренняя энергия идеального и реального газов.
- 4) Интегральный эффект Джоуля-Томсона
- 5) Нарисуйте график температурной зависимости температуры инверсии.
- 6) Объясните принцип, по которому происходит сжижение газов.

## 218. Водоструйный вакуумный насос

1. Уравнение Бернулли, уравнение непрерывности струи и принцип действия водоструйного насоса.
2. Будет ли создавать разрежение водоструйный насос, если вместо воды через него пропускать сжатый воздух?
3. Чем ограничен уровень вакуума, достигаемый с помощью водоструйного насоса? Зависит ли он от типа пропускаемой жидкости и ее температуры?